

GABRIELA MARQUES BISPO DA SILVA

**FREIO ELETRODINAMOMÉTRICO USANDO UM INVERSOR DE
FREQUÊNCIA E UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

GABRIELA MARQUES BISPO DA SILVA

FREIO ELETRODINAMOMÉTRICO USANDO UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA E
UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Octavio Mattos dos Reis

Guaratinguetá

2015

S586f Silva, Gabriela Marques Bispo da
Freio eletrodinamométrico usando um inversor de frequência e um motor de indução trifásico / Gabriela Marques Bispo da Silva – Guaratinguetá, 2015.
66 f : il.
Bibliografia: f. 65-66

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Ocávio Matos dos Reis
Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Mesquita


1. Motores elétricos de indução 2. Automóveis - Freios 3. Inversores elétricos I. Título

CDU 621.313.333

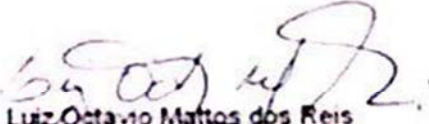
GABRIELA MARQUES BISPO DA SILVA

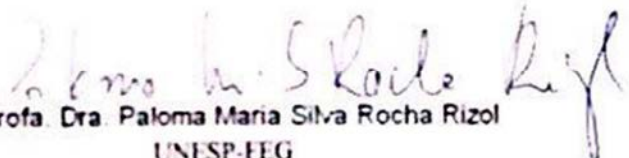
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

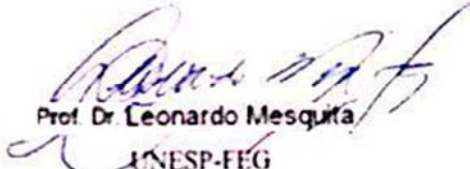
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA


Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Luiz Octavio Mattos dos Reis
UNESP-FEG
Orientador UNESP-FEG


Profa. Dra. Paloma Maria Silva Rocha Rizol
UNESP-FEG


Prof. Dr. Leonardo Mesquita
UNESP-FEG

Dezembro de 2015

de modo especial, dedico este trabalho aos meus pais Cláudio e Zilda pelo apoio aos estudos e às minhas decisões, e aos meus irmãos Igor e Diego por estarem presente nesta trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Cláudio e Zilda, por terem me oferecido suporte em todos os momentos da minha vida acadêmica e por terem me guiado nas minhas escolhas. E aos meus irmãos, Igor e Diego, por terem feito parte do meu dia-a-dia ainda que houvesse distância física entre nós.

Agradeço ao meu professor orientador, Prof. Dr. Luiz Octavio Mattos dos Reis, por ter me ensinado tanto durante o desenvolvimento do trabalho de graduação quanto na sala de aula. Por ter mantido a dedicação em me orientar ainda que tenha havido momentos de dificuldades.

Agradeço a todos que estiveram presente nessa trajetória em Guaratinguetá. Em especial aos funcionários por manter a estrutura da universidade a tornar possível a conclusão do curso. E aos amigos e colegas por dividirem os momentos de alegria e de dificuldade durante esta trajetória.

“Viva e aprenda dos tolos e dos sábios [...] Sonhe até seu sonho se tornar realidade.”

Dream on - Aerosmith

SILVA, G. M. B. **Freio eletrodinamométrico usando um inversor de frequência e um motor de indução trifásico**. 2015. 66 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Considerando que a matriz energética do Brasil é em grande parte baseada em usinas hidrelétricas, a cada momento de pouca chuva, estamos propensos a sofrer falta de energia. Tornando o uso racional da energia não somente algo sensato, mas também importante por questões financeiras. O setor industrial é de suma importância a este contexto econômico brasileiro, pois é dos que mais gera riqueza e emprego. Deve ser ressaltado também que se trata de um dos setores que mais consome energia elétrica. Um dos equipamentos amplamente utilizado nas indústrias é o motor de indução trifásico (MIT), onde, por sua vez, acaba proporcionando relevante desperdício de energia. Por estes motivos, um estudo bem realizado nos MIT's torna-se de grande importância. Uma das formas de se avaliar os parâmetros do MIT é por medições através de dinamômetros mecânicos ou elétricos. Este trabalho visa maior aprofundamento nos estudos (e desenvolvimento) de freio eletrodinamométrico, um tipo de dinamômetro elétrico, pois é o único de uso reversível. Ou seja, é possível medir tanto o conjugado quanto a potência transmitida pelos motores elétricos, tanto pelo método direto como pelo indireto. Além de permitirem maior estabilidade na imposição de cargas, devido a sua natureza de poder regenerar a energia cedida pelos motores que estão sendo ensaiados.

PALAVRAS-CHAVE: Economia no setor industrial. Motor de indução trifásico. Inversor de frequência. Freio eletrodinamométrico.

SILVA, G. M. B. **Electrodynamometer brake using frequency inverter and three phase induction motor**. 2015. 66 f. Graduate Work (Graduation in Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Considering that the Brazilian energy source is based on hydroelectric power plants, every moment that it does not rain enough, we are likely to suffer power outage. Making the rational use of energy not only is wise, but also important for financial issues. The industrial sector is of great importance to Brazilian economic context, because it is one that creates more wealth and jobs. It should be noted that it is one of the sectors that consume more electricity. One of the most used equipment in industry is the three phase induction motor, which ends up providing significant waste of energy. For that reasons, studying three phase induction motors is important. One of the ways to evaluate the parameter of the three phase induction motor is using a dynamometer mechanic or electric. This work aims at further studies (and development) of electrodynamicometer brake, a type of electrical dynamometer, that is the only one with reversible use. This means, it is possible to measure both the torque and the power transmitted by the electric motors, by the direct method and the indirect. Besides it allows greater stability in the imposition of charges, due to its nature of being able to regenerate the energy imparted by the engines being tested.

KEYWORDS: Economy in the industrial sector. Three phase induction motor. Frequency inverter. Electrodynamicometer brake.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do freio de Prony	18
Figura 2: Freios de Foucault	19
Figura 3: Ação das forças de Lorentz	20
Figura 4: Comparação entre curvas características de torque contra rotação dos diversos tipos de freios: (A) Freio mecânico de Prony; (B) Freio hidráulico; (C) Freio de Foucault; (D) Freio a motor elétrico (máquina de corrente contínua)	21
Figura 5: Freio dinamométrico e seu sistema de medição de conjugado.....	22
Figura 6: Representação do princípio de funcionamento de um MIT	24
Figura 7: MIT tipo Gaiola trifásico	25
Figura 8: Correntes trifásicas alternadas equilibradas	26
Figura 9: Representação do campo magnético girante em instantes diferentes, $\pi/6$ e $\pi/2$ respectivamente.	27
Figura 10: Diagrama de potências	34
Figura 11: Diagrama de potência do MIT.....	35
Figura 12: Ação da carga no eixo aumentando o ângulo α (escorregamento).	37
Figura 13: curva do conjugado versos velocidade	38
Figura 14: Diagrama em blocos de um inversor genérico	41
Figura 15: Entrada e saída da ponte retificadora AC-DC	41
Figura 16: Retificação no DB Bus Capacitores	42
Figura 17:Técnica de geração dos sinais PWM.	43
Figura 18:Gráfico corrente x frequência	44
Figura 19 : Torque x Frequência.	45
Figura 20: Gráfico para o método de compensação $I_x R$	46
Figura 21: Vista explodida	48
Figura 22: Teclas e display do drive	49
Figura 23: Yaskawa usado no ensaio na monografia.....	50
Figura 24: Configuração de frequência.....	51
Figura 25: Exemplo de configuração de outros modos de operação.	52
Figura 26: Inversor de frequência e MIT como freio.....	55
Figura 27: Foto geral da bancada.....	58
Figura 28:Aspecto do banco de resistências conectado ao chopper do inversor.	59

Figura 29: Gráfico frequência versus velocidade do motor.	62
Figura 30: Gráfico frequência versus potência dissipada.	63
Figura 31: Gráfico f [Hz] versus Torque [N.m]	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Rotações síncronas correspondentes às frequências mais usuais.....	29
Quadro 2: Lista dos códigos dos parâmetros para o inversor Yaskawa série V1000.	53
Quadro 3:Dados do ensaio	61

SUMÁRIO

1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS: GERAIS E ESPECÍFICOS	16
2.1	GERAIS	16
2.2	ESPECÍFICO	17
3	TIPOS DE FREIOS ELETRODINAMOMÉTRICOS.....	18
3.1	FREIO DE PRONY	18
3.2	FREIO DE FOUCAULT.....	19
3.3	FREIO ELETRODINAMOMÉTRICO.....	20
4	FUNCIONAMENTO DO MIT E DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	24
4.1	MIT.....	24
4.1.1	O campo magnético girante	25
4.1.2	Velocidade síncrona	28
4.1.3	Escorregamento	30
4.1.4	Rendimento	31
4.1.5	Circuito equivalente	31
4.1.6	Fator de Potência.....	33
4.1.7	Potência.....	35
4.1.8	Conjugado	36
4.2	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	40
4.2.1	Motivações para uso do inversor de frequência	40
4.2.2	Esquematização genérica do Inversor de Frequência.....	40
4.2.3	Método de controle escalar do inversor de frequência.....	43
4.2.4	Método de controle vetorial do inversor de frequência	46
4.2.5	O Drive ca série V1000 Yaskawa	47
4.2.6	Programando o Inversor ca Yaskawa série V1000.....	50
5	O CONJUNTO MIT E O INVERSOR COMO FREIO.....	54
6	RESULTADOS DO ENSAIO E CONCLUSÕES	58
6.1	DESCRIÇÃO DO ENSAIO	58
6.2	MATERIAIS UTILIZADOS	60

6.3	RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
6.4	TRABALHOS FUTUROS.....	64
6.5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dados sobre o consumo energético na indústria foi pautado em um artigo publicado pela ABESCO, onde se estima que a indústria seja um dos setores que mais gera riqueza no Brasil por empregar grande número de pessoas e, portanto gerar renda.

Ainda neste seguimento industrial, Ministério de Minas e Energia (MME), publicadas no BEN de 2014, forneceu os dados onde se confirma que o setor industrial é também dos que mais consome energia no Brasil. A WEG (2015) fornece dados onde foi possível abordar a influencia do motor de indução trifásico neste panorama.

Materiais de aula dos professores Pereira (1999), Reis e Silva (2015), Reis, Klaiber e Visconti (2015) forneceram dados e embasamento teórico para que os tipos de freios fossem abordados (Prony, de Foucault e Eletrodinamométrico). O material dos professores Reis, Silva e Rossi (2015) e do livro de Vicent Del Toro (1994) também forneceram conteúdo para desenvolvimento de texto e figuras para o capítulo sobre o motor de indução trifásico (MIT).

No capítulo sobre o inversor de frequência, foi usado o guia de aplicação de inversor de frequência da WEG (2004), dois materiais online, um escrito por Barboletto (2009) e outro pela SOCIES educação e tecnologia (2015) e o manual da Yaskawa (2015). Esses materiais foram usados tanto para composição de texto quanto para fornecimento de figuras.

2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS: GERAIS E ESPECÍFICOS

2.1 GERAIS

Em 2015 enfrentamos mais uma das crises energéticas no Brasil. Uma vez que a maior fonte de produção de energia brasileira é composta por usinas hidrelétricas. A cada momento de seca, grandes são as possibilidades de se passar por crises energéticas. O uso eficiente e racional da energia é um assunto vigente há décadas e torna-se cada vez mais necessário. Seja por aspectos econômicos, como também pelo risco de racionamento de consumo de energia.

Neste mesmo ano, também se enfrentou uma crise financeira. Um dos maiores destaques foi à redução do processo produtivo pelas indústrias. Com produções diminuídas, um grande número de funcionários foi demitido. E este mesmo setor (industrial), segundo a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (Abesco), é um dos que mais gera riqueza em uma economia.

Entretanto, trata-se também de um dos que mais desperdiça energia no Brasil. Pesquisas do Ministério de Minas e Energia (MME), publicadas no BEN de 2014 aponta que o setor industrial como o maior consumidor de energia do país, representando 33,9% do consumo final.

Um dos equipamentos mais usados no setor industrial hoje em dia é o motor de indução trifásico (MIT), principalmente porque os sistemas de distribuição de energia elétrica são em corrente alternada. Além do que, se comparado com o motor de corrente contínua, é mais simples de usar, apresenta menor custo e maior eficiência e menor custo de manutenção, entre outras vantagens.

Trazendo, portanto, o MIT para o contexto da realidade brasileira, este equipamento é bastante representativo em termos de perdas industriais. Estima-se que nestes equipamentos haja um desperdício de 15% da energia total consumida (WEG, 2015). Consequentemente, metodologias e técnicas para procederem-se análise destes equipamentos, desde seu funcionamento básico até seu rendimento, devem ser desenvolvidas e são de grande relevância considerando o aspecto eficiência energética e economia de energia.

2.2 ESPECÍFICO

Trazendo a realidade o tema da presente pesquisa aplicada para o contexto do trabalho de graduação, entende-se que um bom estudo feito sobre os MITs em aplicabilidade possa evitar desperdícios, condicionando estudos sobre a potência do motor, sobre seu rendimento e obtenção de seus parâmetros, por exemplo.

Os freios eletrodinamométricos, também conhecidos como dinamômetros elétricos, são dispositivos eletromecânicos ou somente mecânicos cuja função é acionar ou aplicar uma carga sob um motor em teste. Nessas circunstâncias é possível medir o conjugado desenvolvido no eixo do motor em ensaio, a rotação e a potência útil absorvida (ou produzida) pelo motor.

Dentre os diversos tipos de dinamômetros mecânicos, podem-se citar os freios de Prony, os hidráulicos, os eletromagnéticos (como os de Foucault, baseados em corrente parasita) e os freios que utilizam máquinas de corrente contínua ou máquinas de corrente alternada.

Todavia, os freios eletromagnéticos, principalmente os de motores elétricos, tem uma vantagem sobre todos os outros: são os únicos reversíveis. Ou seja, é possível medir tanto o conjugado quanto a potência transmitida pelos motores elétricos, tanto pelo método direto como pelo indireto. Além de permitirem maior estabilidade na imposição de cargas, devido a sua natureza de poder regenerar a energia cedida pelos motores que estão sendo ensaiados.

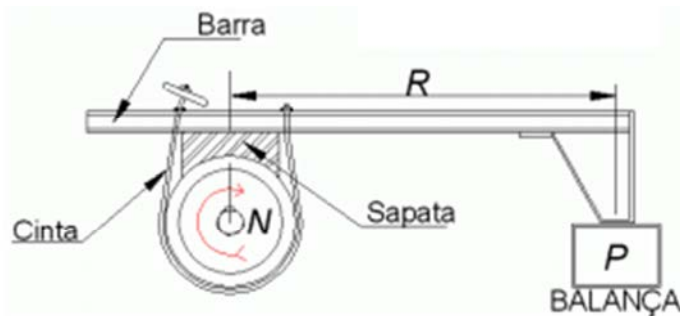
3 TIPOS DE FREIOS ELETRODINAMOMÉTRICOS

3.1 FREIO DE PRONY

O freio de Prony é o dispositivo mais antigo usado para medição de torque e com uso ativo até hoje em dia. Sua tecnologia é baseada em um volante fixo ao eixo circundado por sapatas frenantes, que conecta um braço de comprimento conhecido, com sua extremidade apoiada em uma balança, ou medidor de força, conforme representado pela Figura 1.

Este volante é acionado pelo motor a ser ensaiado e possui momento limitado pela pressão aplicada pelas sapatas ao volante, transmitindo o esforço ao braço apoiado no medidor de força. Através da leitura feita na balança, calcula-se o torque despendido pelo motor.

Figura 1: Representação do freio de Prony



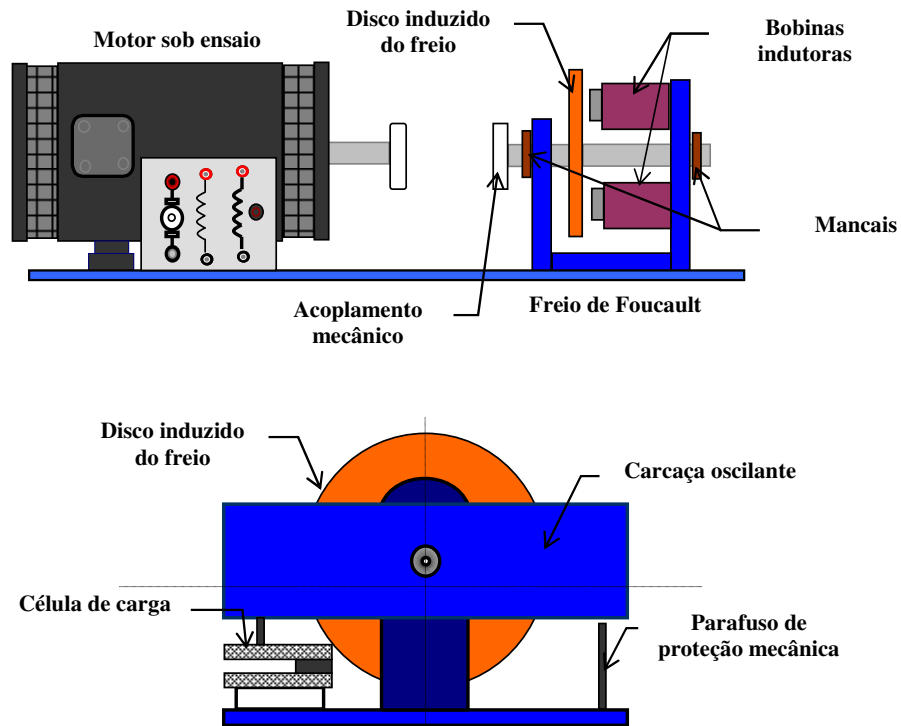
Fonte: (PEREIRA, 1999)

Os freios de Prony vêm sendo substituídos ultimamente devido alguns inconvenientes. Este tipo de freio mantém a carga constante independente da rotação aplicada. Quando a rotação cai, porque o motor pode não suportá-la, a rotação tende diminuir até que haja parada total, levando o motor a danos irreparáveis. Esta reação é um dos motivos pelo qual se busca alternativas em relação ao freio de Prony.

3.2 FREIO DE FOUCAULT

Freios de Foucault, também conhecidos como eletromagnéticos, têm como princípios de funcionamento a criação de correntes parasitas de Foucault. Conforme descrito por Reis e Silva (2015), essas correntes são criadas dentro de um disco metálico e bom condutor elétrico que deve estar inserido e girando no interior de um campo magnético constante, provocando a indução das correntes parasitas de Foucault.

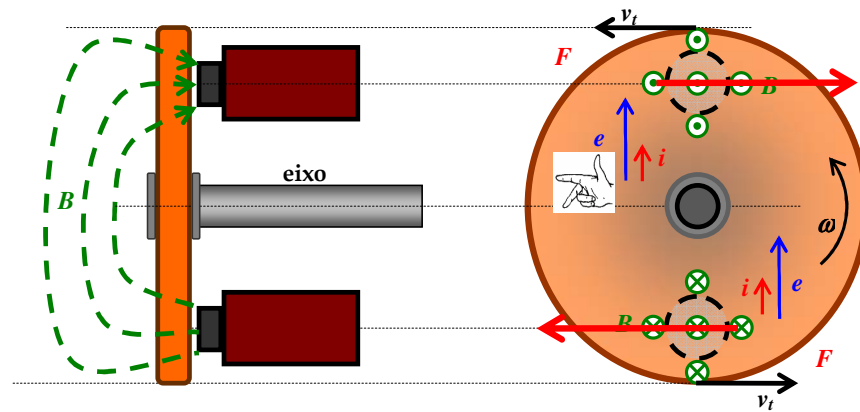
Figura 2: Freios de Foucault



Fonte: (REIS; SILVA, 2015).

O disco metálico mostrado na Figura 2 tem a liberdade de girar livremente mesmo na ausência de corrente circulando nas bobinas dos eletroímãs. Ao começar a circular corrente nas bobinas destes eletroímãs, o disco é freado, pois cria um campo magnético que atravessa o disco induzido às forças de Lorentz, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3: Ação das forças de Lorentz



Fonte: (REIS; SILVA, 2015).

De acordo com a lei de Lenz as f.ems (e), induzidas no disco e ilustradas na Figura 3, forçam as correntes parasitas de Foucault (i) a circularem na mesma direção destas. A presença das correntes de Foucault ortogonais ao campo produzido nos eletroímãs resulta nas forças eletromagnéticas de Lorentz que atuam no disco e são proporcionais ao campo e a intensidade da corrente parasita de Foucault. Ressalte-se que não há desgaste, pois o disco é freado sem a necessidade de atritos mecânicos sobre o mesmo.

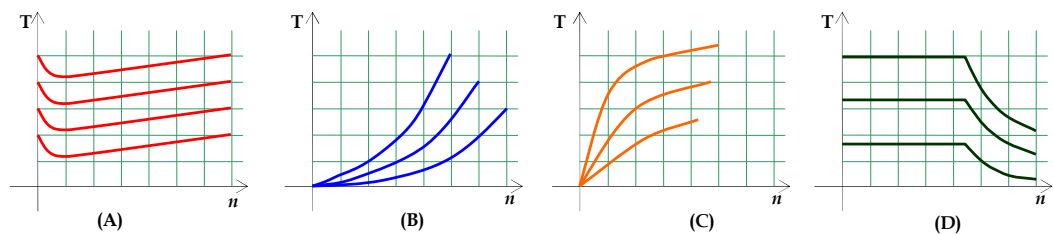
3.3 FREIO ELETRODINAMOMÉTRICO

São conhecidos como freios eletrodinamométricos ou dinamômetros elétricos – aqueles dispositivos cuja função é aplicar carga a motores em teste, sejam mecânicos ou eletromecânicos. Enquanto realizam a medição do conjugado desenvolvido no eixo dos motores durante o ensaio, medem ao mesmo tempo a rotação e a potência útil absorvida ou produzida pelo motor.

A característica que os diferencia dos freios eletromagnéticos, é que usam motores elétricos operando como gerador como elemento frenante. Permitindo o acoplamento de sensores e transdutores para medição do conjugado, rotação, potência transmitida pelas máquinas motrizes, bem como também para os motores a combustão interna, sendo, portanto, os únicos reversíveis, e podendo ser regenerativos.

Se os freios em questão forem baseados em máquinas de corrente contínua, como explica Reis, Klaiber e Visconti (2015), deve ser ajustada a excitação e a carga elétrica conectada à armadura para que haja o controle do conjugado. Todavia, os freios que usam motores assíncronos, impõe o conjugado de carga pela variação da frequência imposta ao motor pelos drivers inversores, o que proporciona ótimo controle. Por isso é bastante utilizado em medições de potência numa faixa variável de décimos a milhares de quilovats, e em amplas faixas de torque e rotação. A Figura 4 compara as curvas características dos diferentes tipos de freios.

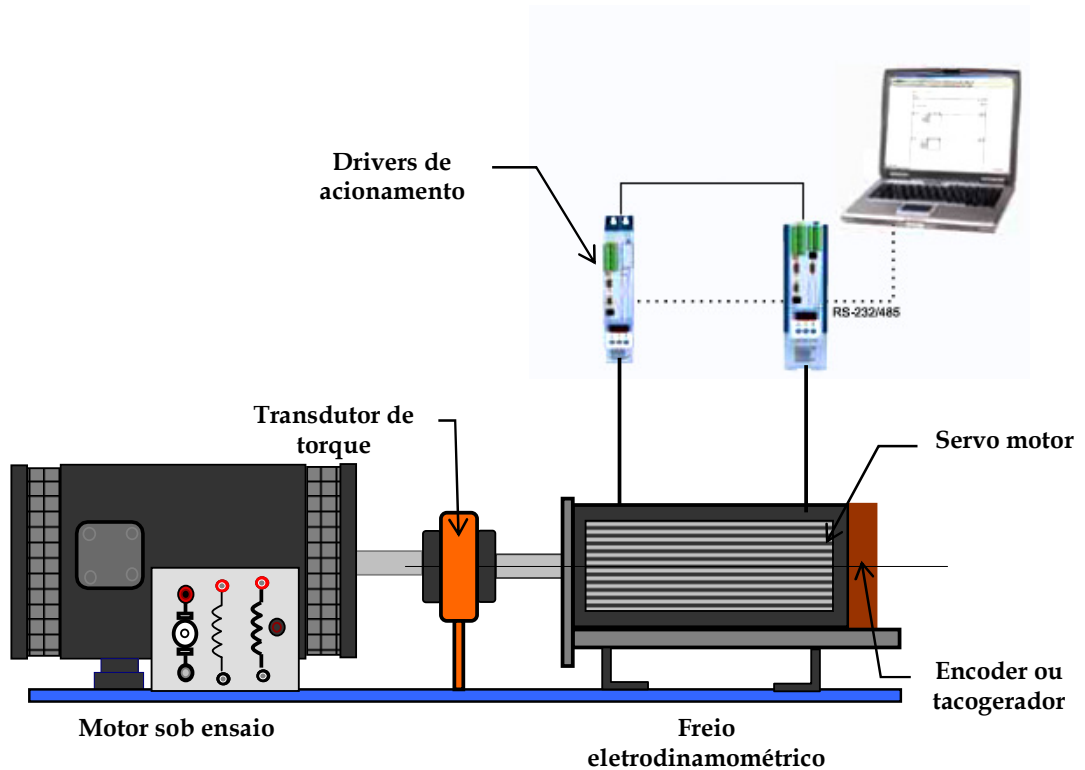
Figura 4: Comparação entre curvas características de torque contra rotação dos diversos tipos de freios: (A) Freio mecânico de Prony; (B) Freio hidráulico; (C) Freio de Foucault; (D) Freio a motor elétrico (máquina de corrente contínua)



Fonte: (REIS; KLAIBER; VISCONTI, 2015)

A medição do freio eletrodinamométrico segue o princípio básico dos outros tipos de freios. Ou seja, através de uma suspensão mecânica da parte estática do freio, de forma que tenha um determinado grau de liberdade em ambos os sentidos de giro do freio, o que permite a livre oscilação da parte fixa. A resultante deste esforço de reação entre a parte rotativa do freio e a fixa que é descarregada em um dispositivo de medição de força, que é uma célula de carga, um dinamômetro ou uma balança. Pode-se ainda medir o torque mecânico de forma direta, bastando para isso introduzir entre o acoplamento do freio com o motor, um transdutor de torque.

Figura 5: Freio dinamométrico e seu sistema de medição de conjugado



Fonte: (REIS; KLAIBER; VISCONTI, 2015)

Através dessa configuração, o conjugado é obtido pelo produto da força da reação pelo braço de ação contra o dispositivo de medição de massa. Já a potência é obtida pelo produto do conjugado pela rotação. A Figura 5 mostra um exemplo de medição.

O tipo de freio se torna tão importante na questão das medições, pois se acredita que a precisão é influenciável de acordo com os diversos tipos de freios (e seus elementos), com os sistemas de suspensão e os equipamentos usados para medir a força. Quando se trata da medida da potência, os dispositivos de medida de rotação e o sistema de controle e estabilização da rotação se tornam mais representativos nas medições.

Deve-se atender à norma IEEE- st 112 método B quando as carcaças não forem construídas em balanço, neste caso a máquina se enquadraria em um projeto especial de custo elevado. Pois para manter a característica de baixa inércia servos motores devem ser utilizados e a medição de torque e potência será pelo método direto.

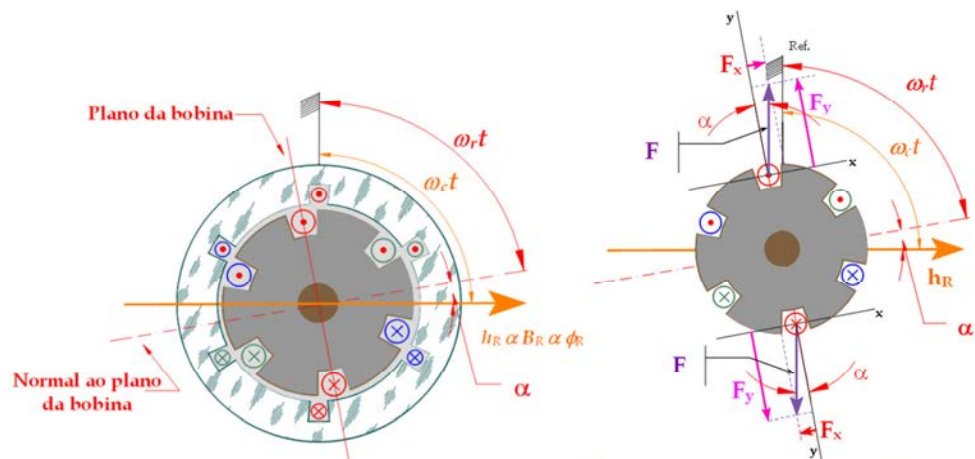
Esta norma permite a medição direta do torque através de um transdutor de torque, sendo mais preciso tanto para a medição do torque como para a medição da potência do eixo porque os atritos dos mancais são desconsiderados. A Figura 5 mostra essa configuração.

4 FUNCIONAMENTO DO MIT E DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

4.1 MIT

Os motores elétricos funcionam baseados nos princípios eletromagnéticos, o motor de indução trifásico é composto basicamente pelo estator e pelo rotor. O campo magnético girante é formado nas bobinas do estator que estão defasadas de 120 graus geométricos no espaço. E o rotor onde os terminais das espiras são conectados em curto circuito, sendo estas atravessadas pelo campo girante, neste processo, é induzido as correntes rotóricas que ao interagirem com o campo girante são induzidas as forças de Lorentz nos condutores axiais das bobinas rotóricas. A Figura 6 ilustra este processo.

Figura 6: Representação do princípio de funcionamento de um MIT



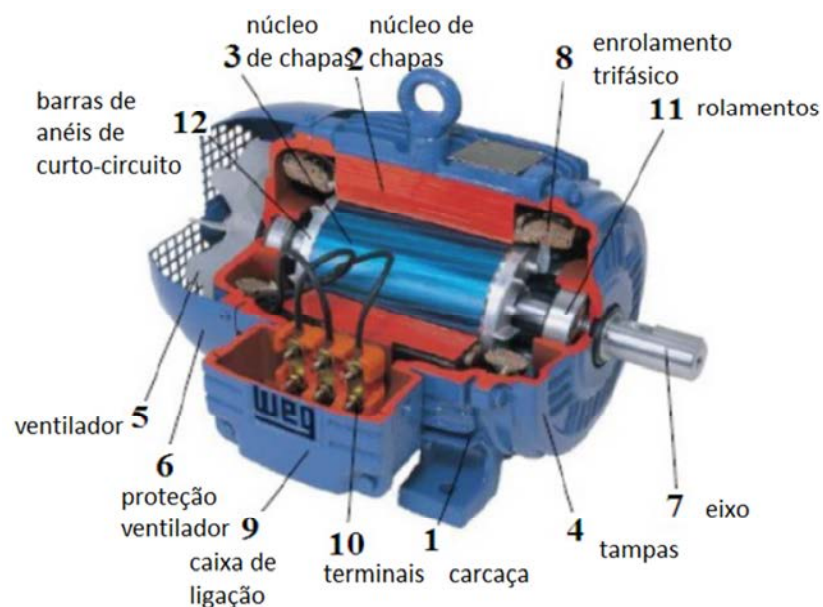
Fonte: (REIS; ROSSI, 2015).

No geral, o estator é composto por chapas fina de aço magnético ou de aço silício. Para diminuir as perdas por correntes parasitas de Foucault e o efeito de histerese, as chapas devem ser tratadas termicamente. As chapas possuem um formato anelado com ranhuras internas, de forma que as bobinas possam ser encaixadas.

O rotor possui características similares ao do estator. Composto por chapas finas de aço magnético tratado termicamente, em formato de anel e seus enrolamentos distribuídos longitudinalmente.

Há dois principais modelos de MIT. O tipo “gaiola de esquilo”, o qual possui o rotor composto por barras condutoras, alocadas em volta do conjunto de chapas do rotor, curto-circuitadas por anéis metálicos nas extremidades. E o “rotor bobinado” cujo rotor tem enrolamentos distribuídos ao redor das chapas do rotor. A Figura 7 mostra um exemplo do MIT mais usado, tipo gaiola de esquilo.

Figura 7: MIT tipo Gaiola trifásico



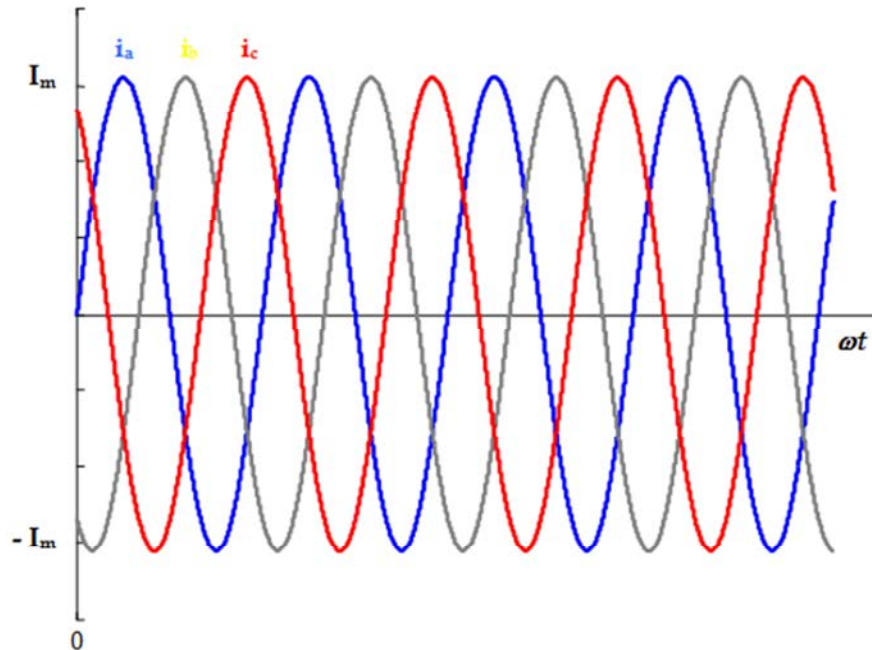
Fonte: adaptado pela autora (WEG, 2005).

4.1.1 O campo magnético girante

O campo magnético girante constitui o fundamento básico de funcionamento de um motor de indução. Este campo magnético girante é criado ao fornecer uma tensão trifásica ao enrolamento do estator, o qual induzirá uma força eletromotriz no rotor, e que fará uma corrente

circular através dos enrolamentos da armadura. O torque é produzido quando a corrente é associada com a densidade de fluxo girante, conforme explicado pelo Vicent Del Toro (1990).

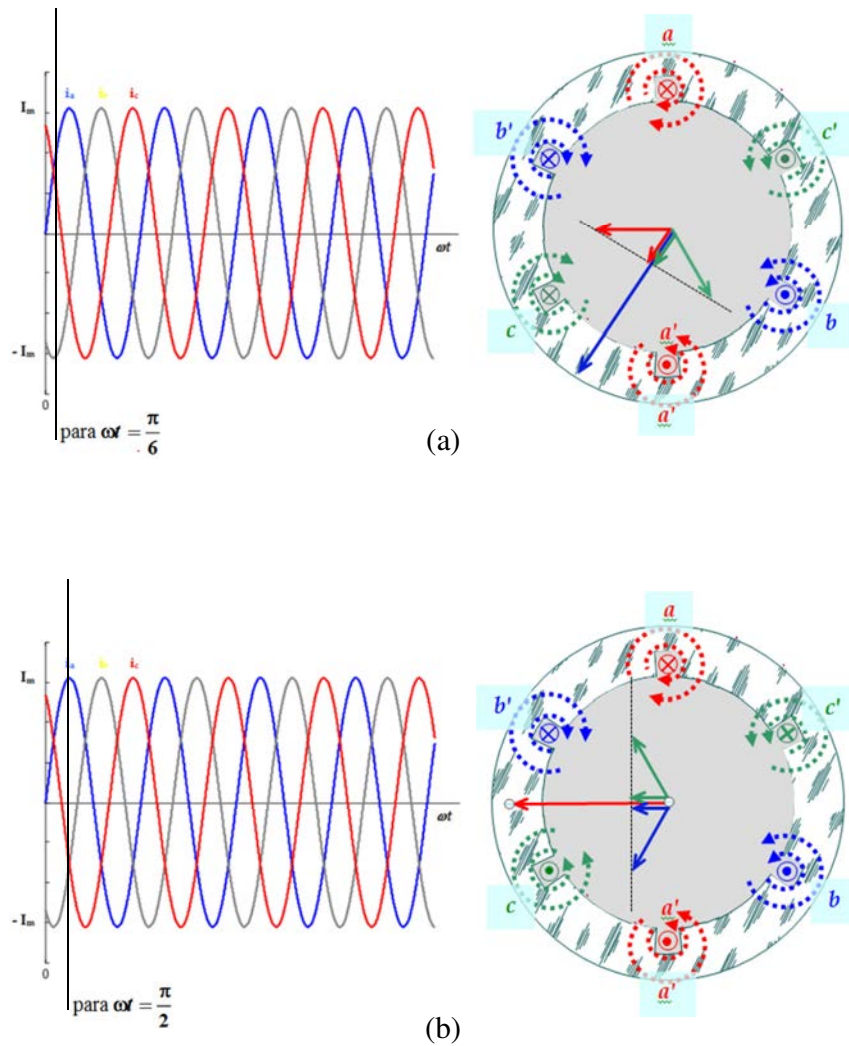
Figura 8: Correntes trifásicas alternadas equilibradas



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015)

A Figura 8 mostra as correntes trifásicas que circulam nas fases do motor defasadas entre si de 120 graus. O índice de cada corrente é respectivo a cada fase onde estão circulando. Portanto a corrente a circula na fase a e assim por diante.

Figura 9: Representação do campo magnético girante em instantes diferentes, $\frac{\pi}{6}$ e $\frac{\pi}{2}$ respectivamente.



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015).

Para obter-se a direção do campo girante recorre-se ao estator mostrado na Figura 9 e as respectivas ondas de corrente ilustradas na mesma Figura. Inicialmente considerando o instante $\frac{\pi}{6}$, onde a corrente na fase A é positiva, nos condutores (a - a') da referida fase, a corrente entra

em a (início da bobina). Adota-se como representação da corrente entrando na folha o símbolo \otimes . Uma vez que a corrente deverá sair pelo final da bobina, ou seja, em a', a representação para a corrente da fase A saído da folha pelo condutor a' será o símbolo \odot . Nestas condições para a fase A, a situação apresentada é a ilustrada na Figura 9(a). Estendendo-se o mesmo raciocínio para as fases B e C tem-se: no mesmo instante considerado para fase A ($\frac{\pi}{6}$) a fase B a corrente é negativa (vide as ondas de corrente ao lado da Figura 9a) assim na bobina (b – b') tem-se a corrente saindo no condutor b \odot e entrando em b' \otimes . Para a fase C a corrente no mesmo instante ($\frac{\pi}{6}$) é positiva portanto para os condutores da bobina (c – c') a corrente está entrando no condutor c \otimes e está saindo no condutor c' \odot .

Reunindo os condutores onde a corrente produz fluxos no mesmo sentido. A determinação destes condutores pode ser obtida através da “regra da mão direita”. A resultante da contribuição de todos os fluxos produzidos nos condutores das bobinas está ilustrada pela seta da Figura 9, que representa o fluxo (campo, ou indução) resultante.

Analisando-se a Figura 9(b), onde foi aplicada a mesma metodologia descrita anteriormente, considerando o instante posterior ($\frac{\pi}{2}$) para determinação da direção do campo girante, conclui-se que o campo no motor de indução gira no interior do circuito magnético, descrevendo uma trajetória circular. À medida que os valores instantâneos da corrente variam no tempo, o campo girante avança no espaço. Pelo fato do campo possuir este tipo de comportamento, ou seja, girar no interior descrevendo uma trajetória circular foi denominado de campo girante.

4.1.2 Velocidade síncrona

Como já explicado, o funcionamento do MIT é baseado no campo magnético girante gerado pelos seus polos. Sua velocidade normalmente é constante e proporcional a este campo magnético. Por isso a velocidade que o campo girante descreve é conhecida como velocidade síncrona. Esta velocidade é calculada de acordo com a equação (1), ou pela rotação em (2).

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad (1)$$

Onde:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{pp}$$

(2)

Adotando:

n_s - é a velocidade síncrona em rpm;

f - é a frequência da rede em Hz;

pp - o número de pares de polos.

Portanto, os polos magnéticos definidos em projeto e confirmados após a fabricação dos motores, combinados com a frequência da rede que é definida pela região onde o motor irá ser instalado são fatores relevantes para determinação da rotação de um MIT. Apresentam-se no Quadro 1 as rotações síncronas mais usuais considerando o par de polos e a frequência do sistema elétrico.

Quadro 1: Rotações síncronas correspondentes às frequências mais usuais.

	$f = 60 \text{ Hz}$	$f = 50 \text{ Hz}$
Pp	$n_s = \frac{60 \cdot 60}{pp} \text{ rpm}$	$n_s = \frac{60 \cdot 50}{pp} \text{ rpm}$
1	3600	3000
2	1800	1500
3	1200	1000
4	900	750
5	750	600
6	600	500

Fonte: (REIS; ROSSI, 2015)

4.1.3 Escorregamento

A grandeza escorregamento é fundamental para a análise do comportamento dos motores de indução, pois de acordo com a variação do escorregamento, alterações importantes ocorrem na operação do motor. Sabe-se que no motor de indução a velocidade rotórica é levemente inferior à velocidade síncrona.

Este fato ocorre devido à natureza construtiva da máquina de indução. O estator transfere uma quantidade de energia ao rotor por meio do campo eletromagnético girante, na rotação síncrona, mas parte desta energia é para suprir as perdas de natureza elétrica e mecânica ocorrem no rotor do motor, comprometendo assim o processo de conversão de energia, ou seja, somente parte da energia transferida ao rotor é convertida em energia mecânica.

Assim sendo o rotor atrasa em relação ao campo girante. Diz-se então que o rotor escorrega em relação ao campo girante. Assim sendo a cada solicitação de energia exercida pelas cargas mecânicas, a velocidade rotórica diminui. Este processo é limitado pela rotação nominal do motor, que corresponde ao escorregamento nominal.

Portanto pode-se definir o escorregamento como sendo uma velocidade relativa entre a velocidade do campo e a velocidade rotórica. Matematicamente a equação (3) define a grandeza escorregamento que é representada sempre em relação à velocidade síncrona nominal do motor.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3)$$

Sendo:

s - o escorregamento;

n_r - a velocidade do motor.

Portanto, escorregamento é por definição a diferença entre a velocidade do campo girante, velocidade síncrona, e a velocidade do giro do rotor. Quanto maior a carga, menor a velocidade do rotor e maior o escorregamento. Se o escorregamento é zero, provavelmente o sistema está

operando em vazio e a velocidade do rotor é praticamente igual à velocidade síncrona. Considerando estes aspectos comprova-se a importância da grandeza escorregamento na operação dos motores de indução.

4.1.4 Rendimento

Rendimento é a relação entre a potência útil, potência mecânica, e potência elétrica. Este parâmetro do motor define a sua capacidade em efetuar a conversão de energia com o mínimo de perdas. Considerando que o motor absorve a energia elétrica e a transforma em potência mecânica, disponível no eixo, a qual será transferida às cargas mecânicas. Matematicamente o rendimento é calculado pela equação (4).

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} \cdot 100\% \quad (4)$$

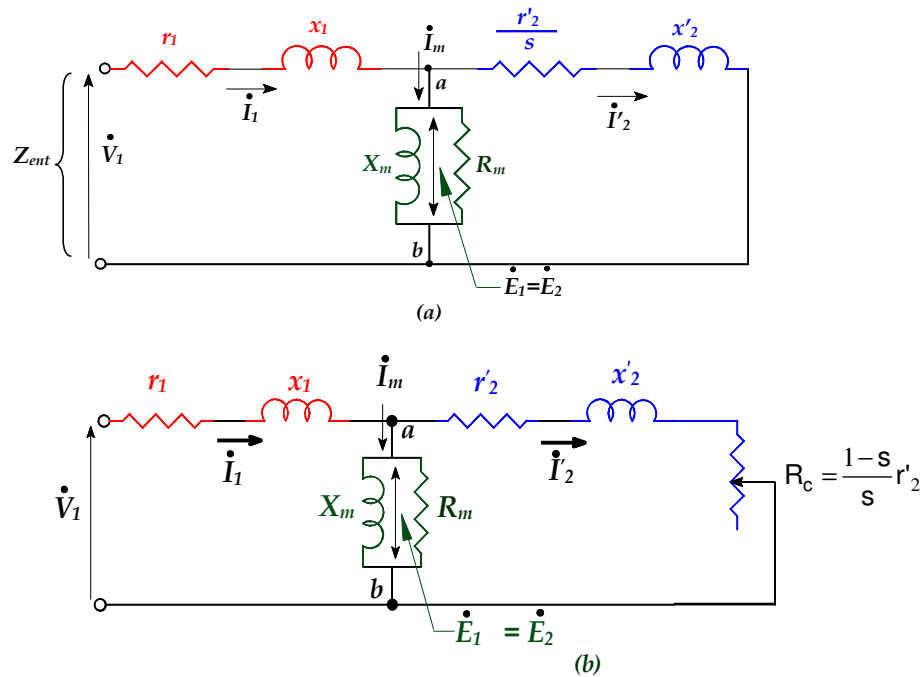
4.1.5 Circuito equivalente

O circuito equivalente do motor de indução é semelhante ao do transformador, sendo a principal diferença o aparecimento do escorregamento, uma vez que se trata de máquina girante e para o caso dos transformadores por serem máquinas estáticas não existe o fator escorregamento. Na Figura 10 estão indicados dois circuitos, referidos ao estator. No primeiro, está representado o circuito do motor de indução por fase na condição de funcionamento para uma carga qualquer

. O segundo circuito ilustrado na Figura 10 tem-se o circuito do motor em uma situação qualquer de operação. Neste circuito foi adicionada à resistência do rotor ($r'2$) uma resistência variável que representa o valor da carga mecânica no eixo do motor, que varia conforme o carregamento imposto ao motor. O valor da resistência de carga R_c é dependente da resistência rotórica e do escorregamento.

Uma vez que a adição de carga no rotor resulta em uma redução na rotação rotórica, o que afeta o escorregamento. Para a determinação do valor da resistência referente à carga deve-se efetuar a diferença das resistências rotóricas presentes em ambos os circuitos da Figura 10.

Figura 10: Circuito equivalente do MIT



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015).

Considerando:

Z_{ent} - Impedância de entrada;

V_1 - a tensão de fase aplicada ao motor;

E_1 - a f.e.m do estator;

E_2 - a f.e.m induzida do rotor;

r_1 - a resistência do estator;

R_m - a resistência correspondente às perdas do núcleo;

s - escorregamento;

r'_2 - resistência medida no rotor refletida no estator;

r'_2/s - a resistência medida no rotor refletida no estator dividida pelo escorregamento;

x_1 - a reatância de dispersão do estator;

X_m - a reatância de magnetização;

x'_2 - a reatância de dispersão medida no rotor refletido do estator;

R_c - resistência da carga;

I_1 - a corrente de fase do estator;

I'_2 - a corrente de fase na bobina do estator;

I_m - a corrente de magnetização;

Quando a tensão da rede V_1 é aplicada nos terminais do estator, faz com que a corrente I_1 comece a circular pelo circuito, gerando a tensão E_2 . Proporcionalmente a relação de espiras do número de espira, semelhante ao transformador, a tensão E_2 é induzida no circuito do rotor. Se refletir a impedância do rotor para o estator, é possível simplificar ainda mais o circuito, conforme a Figura 10, onde se pode também adicionar o modelo para carga mecânica, representada pela resistência variável R_c . Note que a resistência de carga no modelo é dependente do escorregamento do motor e da resistência rotórica.

4.1.6 Fator de Potência

Motores, transformadores, fornos de indução e outros equipamentos deste segmento, consomem energia reativa indutiva. Estas cargas indutivas, assim como já foi mencionado para o MIT, precisam de um campo eletromagnético para funcionar, e por isso em suas operações há a necessidade de dois tipos de potência, a ativa e a reativa. A potência ativa está associada a produzir trabalho, e a reativa esta envolvida em produzir campo magnético ou campo elétrico, neste caso produz campo magnético.

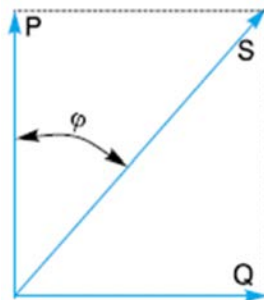
Por fim pode-se resumir que a potência ativa é a que transforma efetivamente a energia em calor, luz, movimento, etc., medida em kW e seus múltiplos. Entretanto, a reativa apenas cria e mantém os campos eletromagnéticos das cargas indutivas. É medida em kvar e seus múltiplos.

Por isso há um controle na potência reativa das cargas. Já que não produzem trabalho, mas somente circulam entre a carga e a fonte de alimentação, ocupando o sistema elétrico que poderia ser desobrigado ao transportar esta energia reativa, pois a energia reativa indutiva pode ser produzida localmente pela instalação de banco de capacitores.

De acordo com essas condições, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina que o fator de potência nas unidades consumidoras deve ser superior a 0,92 capacitivo da meia noite às 6 horas da manhã (quando o sistema elétrico é menos usado) e 0,92 indutivo durante o restante do dia. O descumprimento desta resolução pode resultar em multa, considerando o fator de potência medido e a energia consumida ao longo do mês.

Nestas cargas além da potência ativa e reativa, também há a potência aparente, medida em KVA, que é igual à soma vetorial daquelas outras duas potências. Abaixo a Figura 10 explica esta relação entre as potências através de um diagrama. O fator de potência é calculado de acordo com a equação (5).

Figura 10: Diagrama de potências



Fonte: (WEG, 2005).

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{1000 \cdot P}{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1} \quad (5)$$

Considerando:

$\cos\varphi$ - é o fator de potência;

Q - é a potência reativa em var;

P - é a potência ativa em W;

S - é a potência aparente VA;

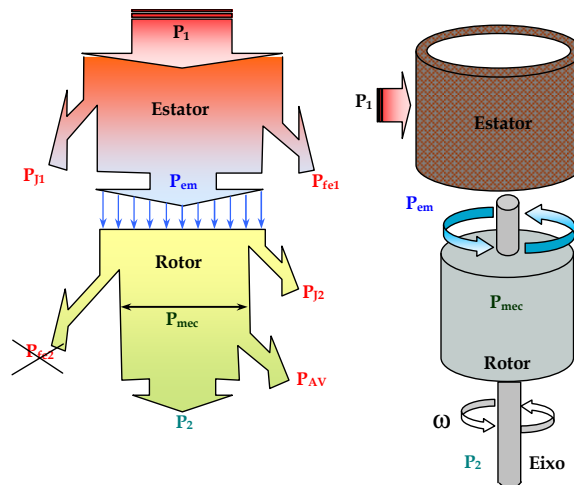
V_1 - é a tensão do motor em Volt;

I_1 - é a corrente do motor em Ampère.

4.1.7 Potência

Considerando que o MIT é um conversor eletromecânico de energia, ou seja, transforma a energia elétrica fornecida pela rede em energia mecânica disponível no eixo, deve-se manter atenção às perdas do processo, sejam elétricas ou mecânicas. O diagrama da Figura 11 exemplifica este processo de perdas.

Figura 11: Diagrama de potência do MIT



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015).

Onde:

P_1 - potência elétrica;

P_{fe1} - são as perdas no núcleo do estator;

P_{J1} - são as perdas joule no estator;

P_{em} - potência eletromagnética transferida do estator para o rotor;

P_{fe2} - são as perdas no núcleo do rotor;

P_{AV} - são as perdas por atrito e ventilação;

P_{J2} - são as perdas joule no rotor;

P_{mec} - potência mecânica total;

P_2 - é a potência disponível no eixo do motor.

A perda P_{J1} são perdas de efeito joule nas bobinas do estator por causa da resistência do enrolamento. Além desta perda, o estator também sofre perdas por correntes parasitas no núcleo, P_{fe1} . A potência eletromagnética P_{em} é transferida para o rotor através do entreferro.

O rotor também sofre perdas por efeito joule pelo cobre do rotor, P_{J2} . Em seguida há a conversão de energia elétrica em mecânica P_{mec} . Devido o movimento do rotor, $P_{A,V}$ representa as perdas por atrito e ventilação. Ao desconsiderar as outras perdas, tem-se a potência que será utilizada, disponível no eixo do motor, P_2 .

4.1.8 Conjugado

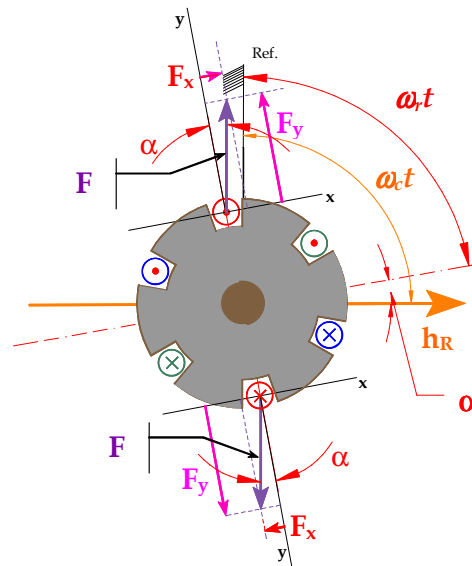
O conjugado do motor é a força que deve ser feita para partir e manter o motor funcionando com a carga. Portanto, para superar a inércia de partida é preciso que o conjugado do motor seja maior que o conjugado resistente no eixo.

Este conjugado não é constante durante a aceleração de partida, portanto a curva varia com a potência e a velocidade do motor, a qual acaba por ser característica de cada motor. Desde o conjugado resistente à tensão aplicada ao motor influenciam na curva do conjugado em função da velocidade.

Acoplando uma carga ao eixo do motor, através de um freio, de forma que seja controlada, aumentando a carga, aumenta-se também o escorregamento, diminuindo a velocidade rotórica. Consequentemente, os campos magnéticos são intensificados e a corrente aumenta para suprir o campo e manter a carga no eixo. Carga maior resulta em menor ângulo entre a tensão e a corrente no rotor, melhorando o fator de potência.

O conjugado induzido do motor tende a sofrer alterações conforme o ângulo α da Figura 12 aumenta devido ao aumento da carga no eixo do motor resultando no aumento da componente F_x das forças de Lorentz, resultando em aumento no torque.

Figura 12: Ação da carga no eixo aumentando o ângulo α (escorregamento).



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015).

Sendo que:

h_R - é o campo magnético girante que corta as espiras do rotor;

α - é o escorregamento medido pela diferença entre as rotações síncrona e rotórica;

F - é a força de Lorentz induzida nas bobinas do rotor;

ω_r - a velocidade angular rotórica;

ω_c - a velocidade do campo ou velocidade síncrona;

F_x - componente da força de Lorentz que produz torque no motor.

O conjugado pode ser calculado de acordo com a equação (6).

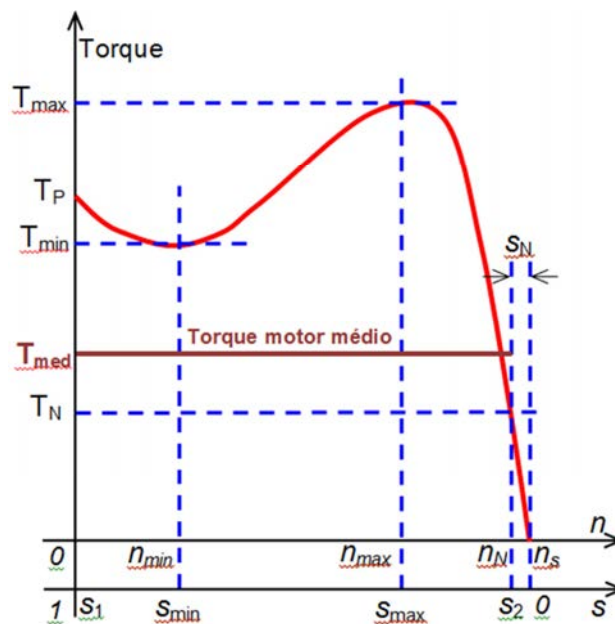
$$T_{mec} = \frac{P_2}{\omega_r} \quad (6)$$

T_{mec} - é o conjugado mecânico em N.m;

P_2 - é a potência de saída.

A Figura 13 facilita o entendimento sobre o conjugado do motor através dos principais pontos de funcionamento do MIT. Nota-se que conforme a rotação diminui há um aumento do conjugado até que seu conjugado máximo seja alcançado. Normalmente T_{max} é em torno de duas a três vezes maior que o conjugado nominal. O conjugado entrará em uma região de instabilidade até atingir o ponto mínimo se a rotação continuar a cair. Este T_{min} é o conjugado necessário para que o motor possa vencer a inércia e iniciar a rotação.

Figura 13: curva do conjugado versus velocidade



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015).

Ao partir o motor, o acionamento é superior ao valor do conjugado mínimo porque além de superar a inércia do motor, também há de se considerar a inércia da carga. Portanto quanto mais próximo da velocidade nominal melhor é o comportamento do conjugado do motor.

4.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

4.2.1 Motivações para uso do inversor de frequência

Como mencionado nas motivações gerais desta monografia, há um grande perda no setor energético industrial, onde o motor de indução pode ser de grande representatividade uma vez que as estimativas é que se perca em torno de 15% da energia total durante seu funcionamento. Com o intuito de economizar energia, os acionamentos elétricos merecem destaque nesta área.

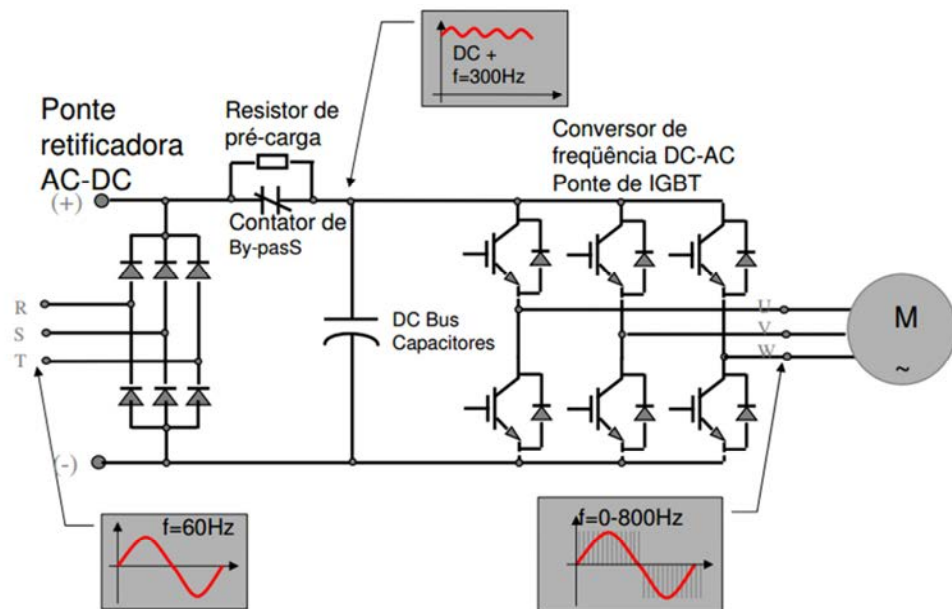
De acordo com a definição da WEG (2004), são considerados sistemas de acionamentos elétricos sistemas que além de converter energia elétrica em mecânica, mantêm o controle deste processo de conversão. Os sistemas de acionamentos mais modernos são constituídos pelo motor de indução, o qual converte energia elétrica em mecânica, associado a dispositivos eletrônicos, cuja função é controlar não somente a potência elétrica a ser entregue ao motor, como também a transferência de torque mecânico, ajustando assim a velocidade e a inércia da carga ao motor.

Foi neste contexto que os inversores ganharam destaque. Principalmente porque com os inversores de frequência é possível obter a variação de velocidade nos motores de indução com economia de energia, melhor desempenho devido à adaptação da velocidade de acordo com a necessidade dos processos, pode-se eliminar o pico de corrente na partida do motor e a manutenção de equipamentos se dá com menor frequência, dentre outras razões.

4.2.2 Esquematização genérica do Inversor de Frequência

De forma simplificada, conforme explicado por Barboletto (2009), o inversor simplesmente transforma a corrente alternada e contínua alimentando uma ponte com IGBTs, que por sua vez reproduz uma corrente alternada controlando a frequência e o módulo da tensão, de forma a oferecer certo controle sobre o torque do motor transferido à carga.

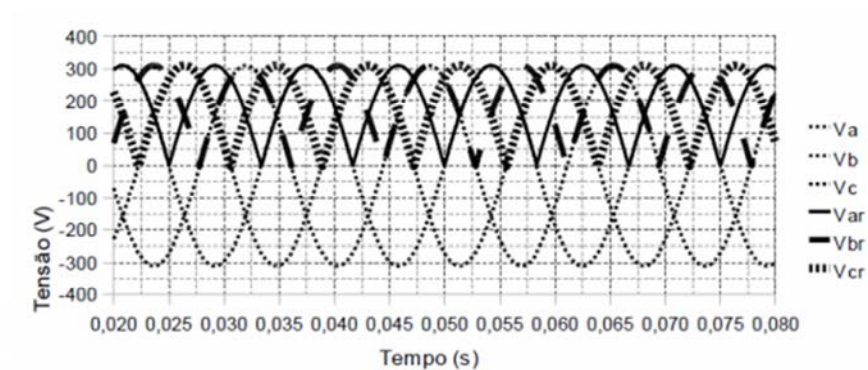
Figura 14: Diagrama em blocos de um inversor genérico



Fonte: (BARBOLETTO, 2009).

A Figura 14 mostra de forma generalizada um diagrama de blocos do inversor de frequência ligado ao motor. A ponte retificadora AC-DC recebe a tensão alternada da rede trifásica, transformando-a conforme a Figura 15.

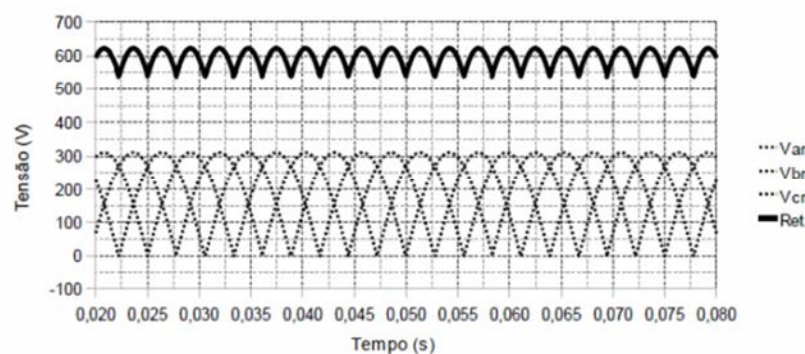
Figura 15: Entrada e saída da ponte retificadora AC-DC



Fonte: (SOCIESC EDUCAÇÃO E TECNOLOGIA, 2015).

O estágio seguinte, é o link DC contendo Banco de Capacitores, trata-se de um filtro cuja responsabilidade é transformar as tensões que foram retificadas em tensões contínuas, conforme a Figura 16.

Figura 16: Retificação no DB Bus Capacitores



Fonte: (SOCIESC EDUCAÇÃO E TECNOLOGIA, 2015).

Por fim, a última etapa, conversor de frequência DC-AC, efetua a geração de sinais senoidais trifásicos com amplitude da tensão e frequência variáveis. Existem varias técnicas utilizadas para modular e obter-se as tensões alternadas. A mais difundida é a que utilizam circuitos geradores de sinais PWM os quais geram os sinais para produzir uma onda portadora de alta frequência, como também os sinais utilizados para acionar os dispositivos da eletrônica de potência de comutação forçada (FETs, GTOs, ou IGBTs) nas topologias: monofásica, bifásica, trifásica, duas pontes de nível ou ainda uma combinação de duas pontes trifásicas.

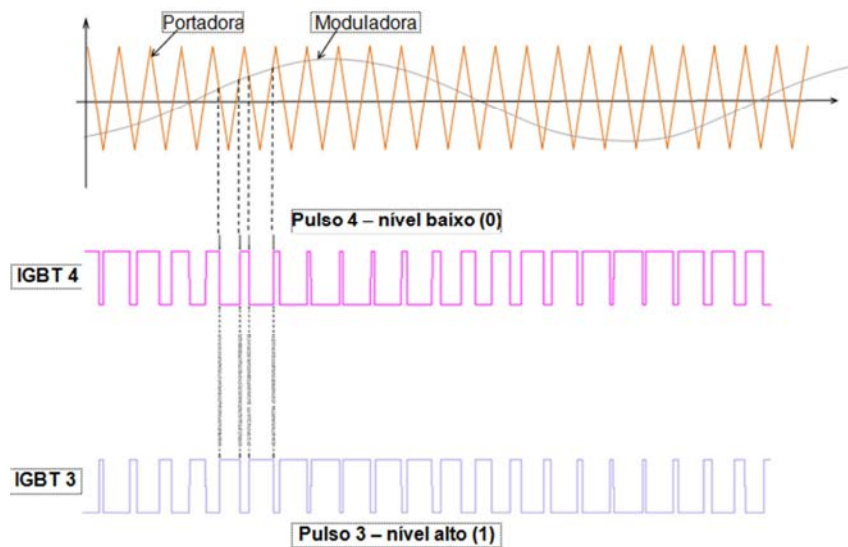
Os pulsos são gerados por meio da comparação de uma de onda portadora triangular de elevada frequência com um sinal de referência denominado por modulador. Os sinais de modulação podem ser gerados pelo próprio gerador PWM, ou podem ser obtidos por sinais externos.

A amplitude da onda moduladora, fase e frequência dos sinais de referência são definidas para efetuar o controle da tensão de saída nos terminais AC da ponte conectado ao circuito

gerador PWM. Os dois pulsos de disparo para os dois semicondutores do mesmo braço da ponte são complementares.

Por exemplo, o pulso 4 é de nível baixo (0) enquanto o pulso 3 é de nível alto (1). Esta situação está ilustrada na Figura 17, onde é exibido os dois pulsos gerados pelo bloco gerador de PWM quando é programado para controlar um braço da ponte.

Figura 17: Técnica de geração dos sinais PWM.



Fonte: (REIS; ROSSI, 2015).

Quando o inversor atua na intensão de alimentar o motor, a energia flui da rede na direção do motor. Da esquerda para a direita conforme o diagrama da

Figura 14. Todavia, se o motor for atuar como um gerador, a energia deve fluir no sentido inverso, do motor para o inversor.

4.2.3 Método de controle escalar do inversor de frequência

De acordo com o material sobre inversores de frequência da WEG (2004), o controle em modo escalar é fundamentado em um modo de controle chamado “V/F constante”. Neste caso, o torque do motor é nominal e se mantém constante independente da velocidade de funcionamento.

A WEG (2004) ainda analisa a corrente do estator de acordo com a resistência (R) e com a reatância indutiva (X_L) de acordo com as equações (7) e (9).

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad (7)$$

$$I = \frac{V}{(R^2 + X_L^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

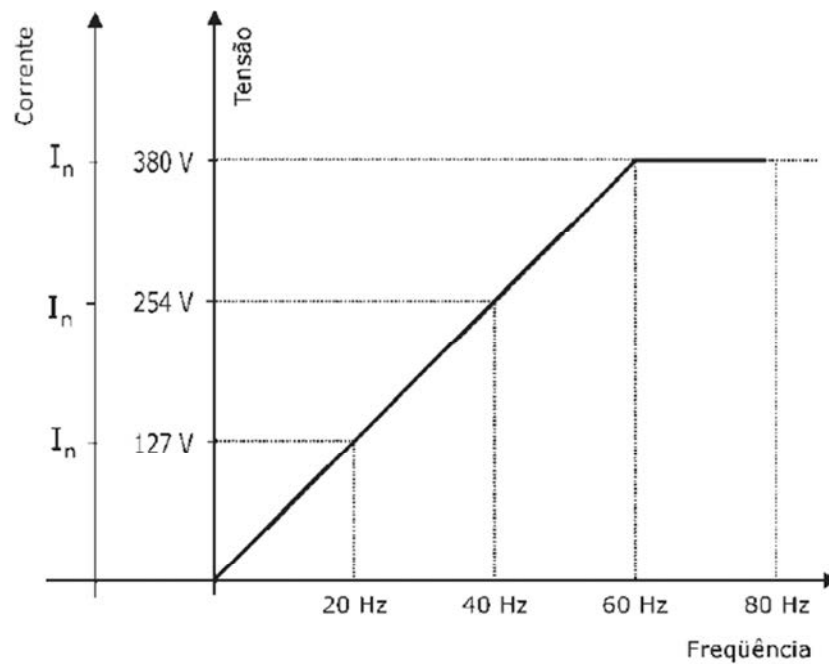
A resistência é desprezada para frequências acima de 30 Hz no modo escalar, pois seu valor se torna irrisório se comparado com a reatância indutiva. Nota-se na equação (8) que a corrente possui parâmetros controláveis pelo inversor, a frequência (f) e a tensão (V).

Simplificando a corrente para a equação (9), constrói-se o gráfico mostrado na Figura 18.

$$I \cong \frac{V}{f} \approx cte$$

(9)

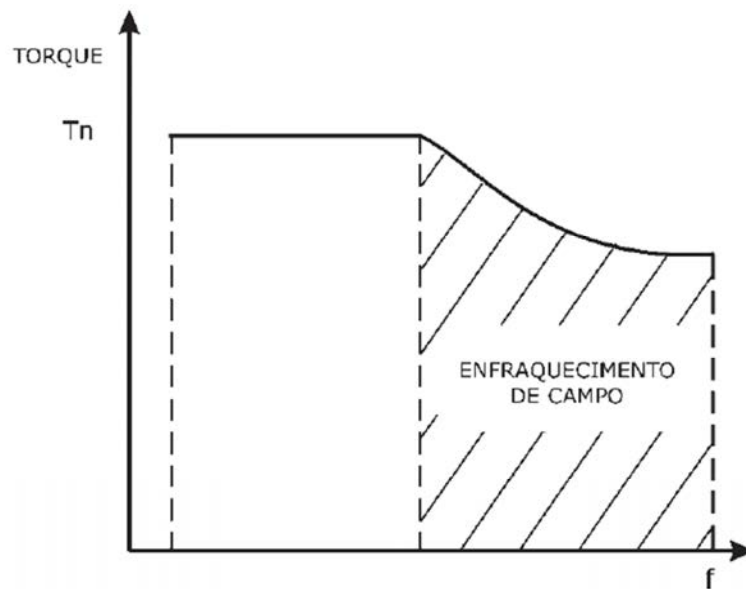
Figura 18: Gráfico corrente x frequência



Fonte: (MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2004).

A tensão possui um valor limitante, que é de acordo com a tensão da rede. Para manter, portanto a constância assumida na equação (9), a corrente diminuirá. Consequentemente o torque também enfraquecerá. A região no gráfico acima dos 60 Hz é denominada região de enfraquecimento de campo. A Figura 19 mostra a relação do torque com a frequência neste caso.

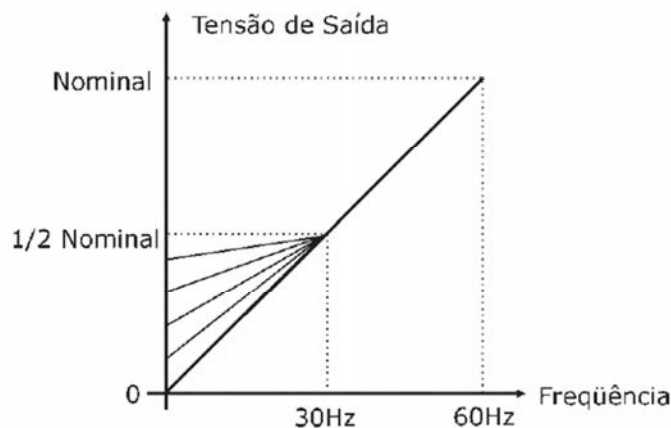
Figura 19 : Torque x Frequência.



Fonte: (MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2004).

Por outro lado, se a frequência for abaixo daqueles 30 Hz, o termo desprezado influencia sim na corrente, influenciando no torque do motor. Para que este torque não caia exageradamente, aumenta-se a tensão do estator pelo método de compensação I_xR como mostrado na Figura 20.

Figura 20: Gráfico para o método de compensação I_xR .



Fonte: (MASCHERONI; LICHTBLAU; GERARDI, 2004).

Conforme a WEG (2004) recomenda, este método de controle escalar em inversores de frequência é mais usado em aplicações que não precisam de muita dinâmica e nem alta precisão ou controle de torque. Este tipo de controle oferece uma precisão para a rotação do motor de 0,5% da rotação nominal quando não há variação de carga. E de 3% a 5% quando a carga está sendo variada. E de 0% a 100% sobre o torque nominal.

4.2.4 Método de controle vetorial do inversor de frequência

A WEG (2004) também sugere o método de controle vetorial para situações que exigem aplicações com maior dinâmica, e necessita de respostas rápidas, precisão na regulação da velocidade. É necessário que o motor tenha um controle preciso de torque em uma larga faixa de condições de operações.

As principais vantagens deste método de controle é a alta precisão no controle da velocidade, o elevado desempenho na dinâmica, o controle de torque linear na regulação da

posição ou da tração e a possibilidade de operação suave para baixas velocidades sem variações no torque, ainda que a operação seja com carga variada.

A nomeação deste método vem do fato de a corrente na bobina do estator ser composta por dois vetores. A corrente de magnetização que produz fluxo, e a corrente que produz o torque efetivamente. A resultante vetorial dessas duas correntes representa a corrente total.

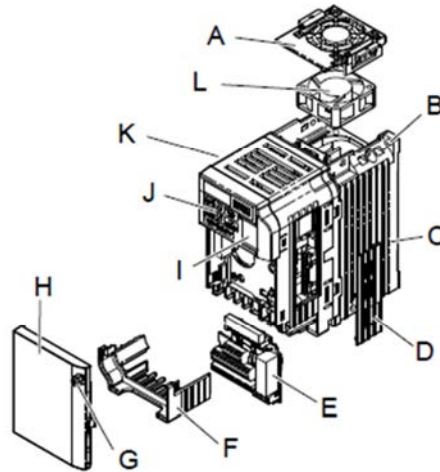
Além disso, é preciso um microprocessador para a aplicação deste método e saber alguns parâmetros do motor, como a resistência e a indutância do estator e do rotor. Pois o cálculo destas correntes precisa ser em tempo real e somente um microprocessador é capaz disso. A qualidade das componentes da corrente total é que caracteriza o desempenho do inversor.

Em alguns casos, tem-se a necessidade de um encoder junto ao motor para melhorar a dinâmica (o sistema básico, sem o encoder é conhecido como “sensorless”). A vantagem da realimentação com o encoder é obter o controle sob a velocidade e o toque. Também possui uma boa regulação e resposta dinâmica, como por exemplo, regulação de velocidade a 0,01% e regulação de torque a 5%.

4.2.5 O Drive ca série V1000 Yaskawa

A série Yaskawa V1000 é uma classe mundial compacta atual que definiu um novo padrão. Demanda por produção eficiente e melhores manutenções estão em ascensão e em uma intensa competição global. Os produtos Yaskawa atingiram o objetivo de estar em controle com produtos que fazem os negócios fluírem. O ótimo equilíbrio entre energia, produto, manutenção de risco e longa durabilidade foi atingido pela marca. A vantagem do V1000 é providenciar tamanha qualidade em um tamanho compacto (Yaskawa). A Figura 21 mostra uma vista explodida deste equipamento.

Figura 21: Vista explodida



Fonte: (MANUAL YASKAWA, 2015).

Sendo:

A – Cobertura do ventilador

B – Furo de montagem

C – Dissipador de calor

D – Cobertura do conector da fonte de alimentação opcional de 24 Vcc

E – Placa de terminais

F – Cobertura do termina

G – Parafuso da cobertura frontal

H – Cobertura frontal

I – Porta de comunicação

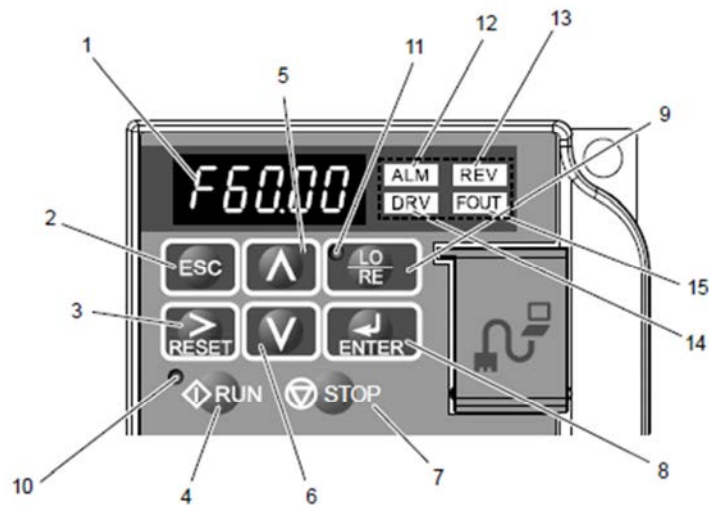
J – LED operador

K – Caixa do conversor

L – Ventilador de resfriamento

Para plena utilização de suas funções é importante compreender seu display, conforme Figura 22.

Figura 22: Teclas e display do drive



Fonte: (MANUAL YASKAWA, 2015).

1 – Trata-se da área de exibição da informação. Exibe a frequência, número de parâmetros e etc.

2 – A tecla ESC serve para retornar ao menu anterior.

3 – A tecla RESET move o cursor para a direita e reseta o drive para remover uma condição de falha.

4 – A tecla RUN inicia o drive.

5 – A tecla com a seta para cima apenas desloca verticalmente para selecionar os números de parâmetros, valores de ajuste e etc.

6 – A tecla com a seta para baixo também é para selecionar números de parâmetros, valores de ajuste e etc.

7 – A tecla STOP para o drive.

8 – A tecla ENTER seleciona todos os modos, parâmetros, ajustes e etc.

9 – A tecla de seleção LO/RE alterna o controle do drive entre o operador e os terminais do circuito de controle.

10 – A luz RUN acende quando o drive opera o motor.

11 – A luz RO/RE acende quando o operador está selecionado para operar o drive.

Foram realizadas importantes ajustes neste equipamento que foram necessários para o desenvolvimento do projeto. As funções utilizadas e as parametrizações serão melhor apresentadas no capítulo de desenvolvimento, explicando conforme as necessidades de cada parametrização. A Figura 23 é uma foto tirada do inversor Yaskawa usado na montagem do freio eletrodinamométrico para o desenvolvimento da monografia.

Figura 23: Yaskawa usado no ensaio na monografia.

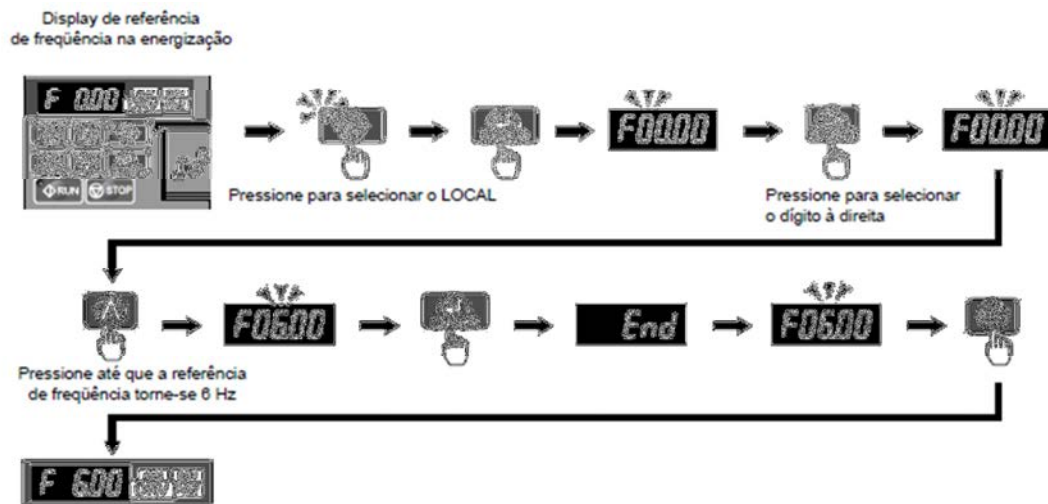


Fonte: da autora.

4.2.6 Programando o Inversor da Yaskawa série V1000

Para a execução do projeto, foi necessário aprender melhor como ajustar o inversor de frequência de acordo com as necessidades de um motor para aplicação de freio. A Figura 24 mostra como alterar a frequência.

Figura 24: Configuração de frequência.



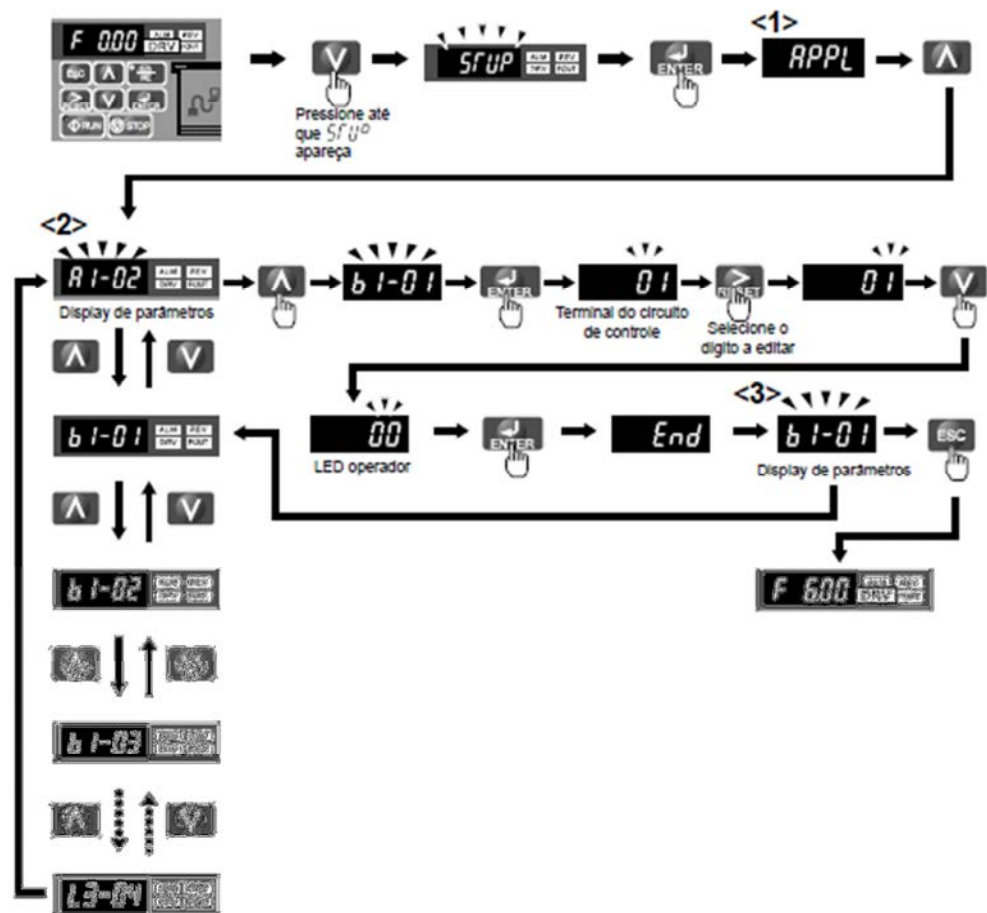
Fonte: (MANUAL YASKAWA, 2015).

Basta pressionar o botão LO/RE (local/remoto) e selecioná-la pressionando ENTER. Aparecerá o índice da frequência. Com a tecla RESET direcionada para a direita, o cursor se movimentará para a direita, possibilitando a alteração do valor de algum dos dígitos. Com a tecla que tem o desenho de seta para cima, o valor é aumentado.

Pressionando ENTER novamente o valor é armazenado. No display aparecerá End, confirmando o fim da ação. Em seguida aparecerá novamente o valor da nova frequência. Com a tecla ESC, aplica-se esta nova frequência. No caso, ao motor que agirá como freio.

Se outros parâmetros precisarem reajustados, é preciso acessar o menu “ modo de operação”. Neste caso, deve-se pressionar a tecla com a seta para baixo até que no display apareça “SRUP”, sigla para o modo de operação, conforme a Figura 25 exemplifica. Apertando a tecla ENTER a seleção é confirmada.

Figura 25: Exemplo de configuração de outros modos de operação.



Fonte: (MANUAL YASKAWA, 2015).

Quando no display estiver sendo exibido APPL, alterasse o parâmetro a ser modificado pressionando a tecla seta para baixo até atingir o que se deseja. O Quadro 2 mostra a lista dos parâmetros possíveis de se configurar e seus respectivos códigos. A sequência de definição é similar ao da frequência. Com a tecla ENTER seleciona o parâmetro a ser modificado.

Aparecerá então no display o valor para a opção escolhida, sendo possível de se alterar com as setas para cima ou para baixo. Com as setas para esquerda ou para a direita se escolhe o dígito a ser alterado. Definido o valor, aperta-se ENTER, mostrando em seguida novamente o

parâmetro que sofreu alterações. Com a tecla ESC a nova configuração é aplicada ao sistema. O display torna ao seu estado principal mostrando a frequência.

Quadro 2: Lista dos códigos dos parâmetros para o inversor Yaskawa série V1000.

Parâmetro	Nome	Parâmetro	Nome
A1-02	Seleção do método de controle	E1-03	Seleção do padrão V/f
b1-01	Seleção 1 da referência da frequência	E1-04	Frequência máxima de saída (FMAX)
b1-02	Seleção 1 do comando de operação	E1-05	Tensão máxima (VMAX)
b1-03	Seleção de método de parada	E1-06	Frequência nominal (FA)
C1-01	Tempo 1 de aceleração	E1-09	Frequência mínima de saída (FMIN)
C1-02	Tempo de desaceleração 1	E1-13	Tensão nominal (VBASE)
C6-01	Seleção de funções	E2-01	Corrente nominal do motor
C6-02	Seleção da frequência portadora	E2-04	Número de pólos do motor
d1-01	Referência de frequência 1	E2-11	Taxa de capacidade do motor
d1-02	Referência de frequência 2	H4-02	Ajuste de ganho do terminal FM
d1-03	Referência de frequência 3	L1-01	Seleção de função de proteção do motor
d1-04	Referência de frequência 4	L3-04	Seleção da prevenção de travamento durante a desaceleração
d1-17	Referência da frequência de jog		
E1-01	Referência de tensão de entrada		

Fonte: (MANUAL YASKAWA, 2015).

5 O CONJUNTO MIT E O INVERSOR COMO FREIO

De acordo com o guia de aplicações de inversores de frequência da WEG (2004), a aplicação do inversor de frequência juntamente com o motor de indução, proporciona uma alimentação de tensão e frequência variáveis. Diferentemente de quando alimentado pela rede.

A maior necessidade dos engenheiros ou técnicos é entender o funcionamento dos motores acionados por inversores. Para suprir esta necessidade a condição pode ser obtida com o entendimento da característica de torque contra velocidade para vários valores de tensão e frequência. Esta característica pode solucionar requisitos importantes como o funcionamento do motor, o comportamento do motor com determinada carga, como aperfeiçoar o funcionamento do motor e carga, dentre outros.

No setor industrial, há diversos equipamentos que requerem o uso de velocidade variável, como as bombas, para variação da vazão de líquidos, ventiladores, para variação de vazão de ar, tornos, para variação de velocidade de corte, dentre outros inúmeros.

A WEG (2004) baseia sua explicação da aplicação do inversor no motor de indução a partir da equação (10). Devido à possibilidade de variar a velocidade de rotação se houver disponibilidade de um dispositivo que permita variar a frequência da tensão de alimentação.

$$n_r = \frac{60 * f * (1 - s)}{pp}$$

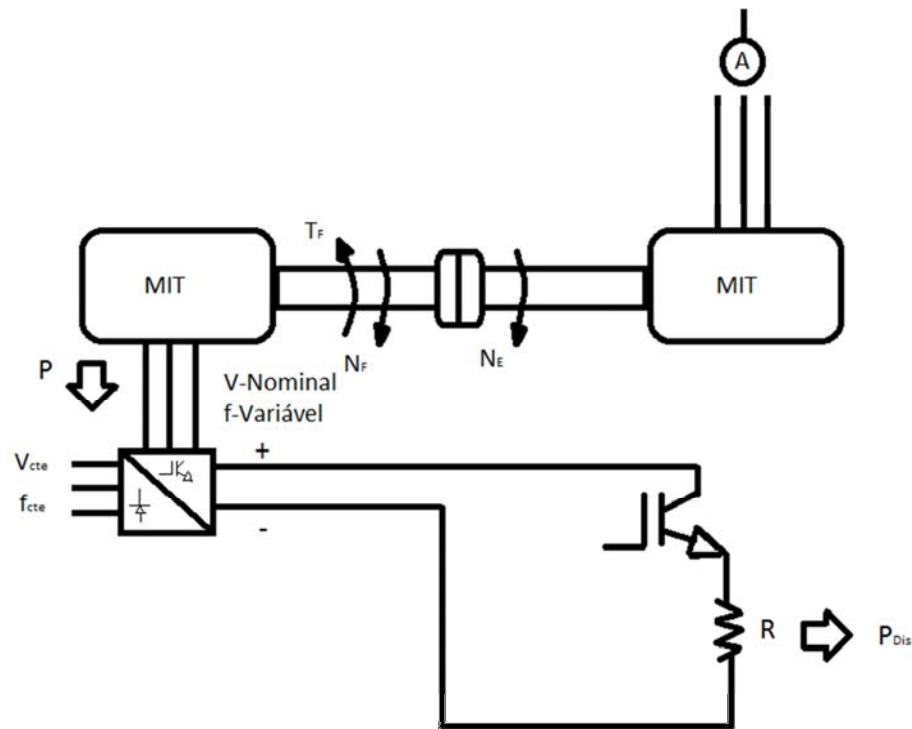
(10)

Onde:

- n - seja a velocidade em rpm;
- f - a frequência da rede em Hertz
- s - o escorregamento;
- pp -o número de pares de polos.

O sistema de inversor de frequência e motor de indução trifásico como freio explanado nesta monografia, segue, entretanto um desenvolvimento um pouco mais específico, conforme a Figura 26.

Figura 26: Inversor de frequência e MIT como freio.



Fonte: da autora.

Sendo:

N_E - velocidade síncrona;

N_F - velocidade síncrona de frenagem;

T_F - torque de frenagem;

P - potência transmitida do MIT ao inversor;

P_{Dis} - potência dissipada.

Acoplam-se dois motores de indução, sendo um alimentado pela rede de distribuição de energia e o outro pelo inversor de frequência. Foi preciso acrescentar um resistor a saída ao chopper existente no link DC do inversor para dissipação de potência. Este sistema é baseado na seguinte equação (11), note que na equação se o escorregamento ficar negativo o torque ficará negativo. Portanto o grande problema a ser solucionado é tornar o escorregamento do motor que funcionará como freio tornar-se negativo, para impor o torque frenante T_F ao motor a ser ensaiado.

$$T = \frac{3pp}{2\pi f} * \frac{V_{1f}^2}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} * \frac{r'_2}{s}$$

(11)

Adotando:

T - torque motor;

pp - par de polos;

f - frequência;

V_{1f} - tensão de fase aplicada ao primário;

r_1 - resistência do enrolamento de fase do estator;

x_1 - reatância de dispersão do estator;

r'_2 - resistência do rotor refletida no estator;

x'_2 - reatância de magnetização do rotor refletida no estator;

s - o escorregamento.

Para que este objetivo seja alcançado deve-se analisar a equação do escorregamento definido em (3), onde é uma relação entre as rotações do campo e do rotor. Porém esta equação pode ser também representada matematicamente pela equação (12) relacionando as frequências impostas ao motor (freio) e a rotação do rotor do conjunto motor e freio (n_e).

$$s\% = \frac{f_1 - f_r}{f_1} 100 \quad (12)$$

Onde:

$s\%$ - é o escorregamento;

f_1 - é a frequência imposta ao motor (freio) pelo inversor;

f_r - frequência de rotação mecânica, conjunto motor e freio.

Analisando-se a equação (12) se for reduzida a frequência do inversor (f_1), o escorregamento ficará negativo e conseqüentemente o torque, equação (11). Uma vez que foi imposto um torque frenante a rotação do conjunto também diminuirá sensivelmente. Este processo poderá ser gradativamente repetido até que o motor atinja sua carga nominal.

Deve-se também analisar a corrente que flui do freio para o inversor e chegando ao link DC. Convém notar que esta corrente aumentará a cada redução na frequência do inversor, uma vez que o torque motor aumentará. E esta corrente dissipará a potência (P_{dis}) sobre o banco de resistores indicado por R na Figura (25). A potência dissipada pode ser calculada, medindo-se a corrente que flui pelo resistor e aplicando-se a equação (13).

$$P_{Dis} = R * I^2 \quad (13)$$

Pode-se, portanto definir o valor do torque no motor de acordo com a equação (14).

$$T = \frac{P_{Dis}}{\omega_r} \quad (14)$$

6 RESULTADOS DO ENSAIO E CONCLUSÕES

6.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Inicialmente montou-se em um painel o inversor Yaskawa e efetuaram-se as conexões por meio de bornes que permitiriam o acesso rápido às conexões. Além disso, a montagem já daria a ideia para se desenvolver uma bancada que fosse didaticamente adequada às aulas práticas de laboratório, conforme ilustra a Figura 27.

Figura 27: Foto geral da bancada.



Fonte: da autora.

Após a montagem foi efetuada a programação do inversor de forma que se pudessem alterar os valores da frequência durante a operação. Devido à energia durante o processo de frenagem,

foi necessária a instalação de um banco de resistores externo conectado ao chopper existente no link DC do inversor, conforme detalha a Figura 28.

Figura 28: Aspecto do banco de resistências conectado ao chopper do inversor.



Fonte: da autora.

Depois de feitas as devidas adequações no inversor, efetuou-se a conexão de um motor de indução, para ser ensaiado, ao conjunto inversor motor de indução (freio), conforme ilustra a Figura 26. Certificou-se que tanto o freio como o MIT em ensaio, ambos estavam girando no mesmo sentido. Ajustou-se a frequência do inversor para um valor pouco acima de 60Hz, no caso, 61Hz. Partiu-se o motor de indução a ser ensaiado, ligando-se o inversor a seguir.

Deixou-se o conjunto girar livremente por alguns minutos para estabilizarem as rotações e atingirem o regime permanente. Após iniciou-se a redução da frequência no inversor para 58Hz, a partir deste momento o inversor inverteu o fluxo de potência que a partir de então passou a ser

em direção ao link DC. Ao subir a tensão no link DC o choper passou a funcionar drenando toda a energia ali acumulada sobre o banco de resistências. Os resultados são apresentados a seguir.

6.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Trata-se de um método elaborado, mas de montagem simples e poucos materiais. Segue a lista:

- Cabos;
- Resistor (potência em torno de 1kW);
- Inversor de Frequência;
- Amperímetro;
- Voltímetro;
- Tacômetro;
- Motor de indução trifásico.

6.3 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a conclusão da primeira etapa do projeto, a montagem da bancada, e certificado de que os equipamentos estavam funcionando conforme a necessidade, o ensaio foi realizado. O Quadro 3 mostram os dados colhidos.

Deve-se considerar:

f - como a frequência alterada no inversor e aplicada ao motor que age como freio;

V_l - a tensão de alimentação do sistema;

n_s - como a velocidade síncrona;

n_r - como a velocidade do motor;

s - como o escorregamento;

I_m - a corrente do motor;

R - o valor do resistor externo;

P_{Diss} - a potência dissipada;

T_F - o torque de frenagem;

ω_r - como a velocidade angular de frenagem;

I_F - a corrente de frenagem.

Quadro 3: Dados do ensaio

f [Hz]	V _l [V]	n _s [rpm]	n _r [rpm]	s %	I _m [A]	R [Ω]	P _{Diss} [W]	ω_r [rpm]	T _F [N.m]	I _F [A]
60,00	220,00	1800,00	1797,00	0,17	1,80	45,20	-	188,18	-	-
59,00	220,00	1800,00	1781,00	1,06	2,00	45,20	1,81	186,51	0,01	0,20
58,00	220,00	1800,00	1764,00	2,00	2,30	45,20	16,27	184,73	0,09	0,60
57,40	220,00	1800,00	1752,00	2,67	2,60	45,20	36,61	183,47	0,20	0,90
56,80	220,00	1800,00	1741,00	3,28	2,80	45,20	54,69	182,32	0,30	1,10
56,10	220,00	1800,00	1727,00	4,06	3,20	45,20	88,59	180,85	0,49	1,40
55,70	220,00	1800,00	1719,00	4,50	3,40	45,20	101,70	180,01	0,56	1,50
55,30	220,00	1800,00	1711,00	4,94	3,60	45,20	115,71	179,18	0,65	1,60
54,50	220,00	1800,00	1693,00	5,94	4,00	45,20	146,45	177,29	0,83	1,80

Fonte: da autora.

A frequência foi o aspecto mais importante da realização do experimento. Conforme seu valor foi alterando, os outros parâmetros foram sofrendo a consequência. Podem-se medir as alterações na velocidade do motor, na corrente do motor e na corrente de frenagem. Com um ohmímetro a resistência equivalente também foi medida.

Contudo, o restante das variáveis precisou ser calculado. O escorregamento foi calculado de acordo com a equação (3), apresentada no capítulo 4, sobre o motor de indução trifásico. A potência pode ser calculada através da equação (13), e o torque de acordo com a equação (14), ambas explicadas no capítulo 5, que trata sobre o conjunto inversor de frequência e o MIT.

Já a velocidade angular do motor, foi calculada através da equação (15):

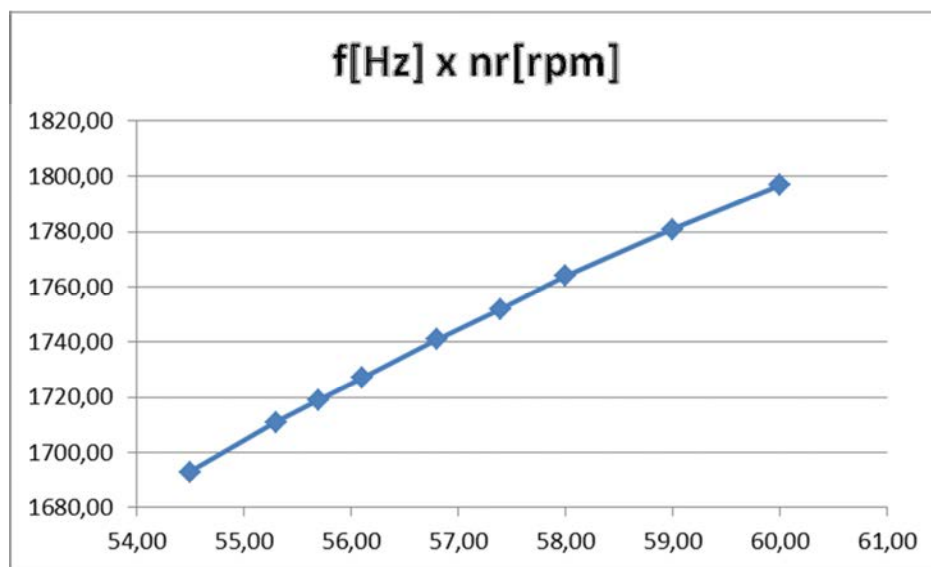
$$\omega_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_r}{60}$$

(15)

Percebe-se que conforme a frequência é diminuída, como é esperado, cai a rotação do motor, conforme mostra a Figura 29. Consequentemente, o escorregamento sofre um aumento, já que a velocidade síncrona é constante, um dado de placa do motor, que neste caso vale 1800 rpm.

A corrente do motor também aumenta, ao ponto de ultrapassar a corrente nominal que vale aproximadamente 3 A – dado também informado pela placa do motor.

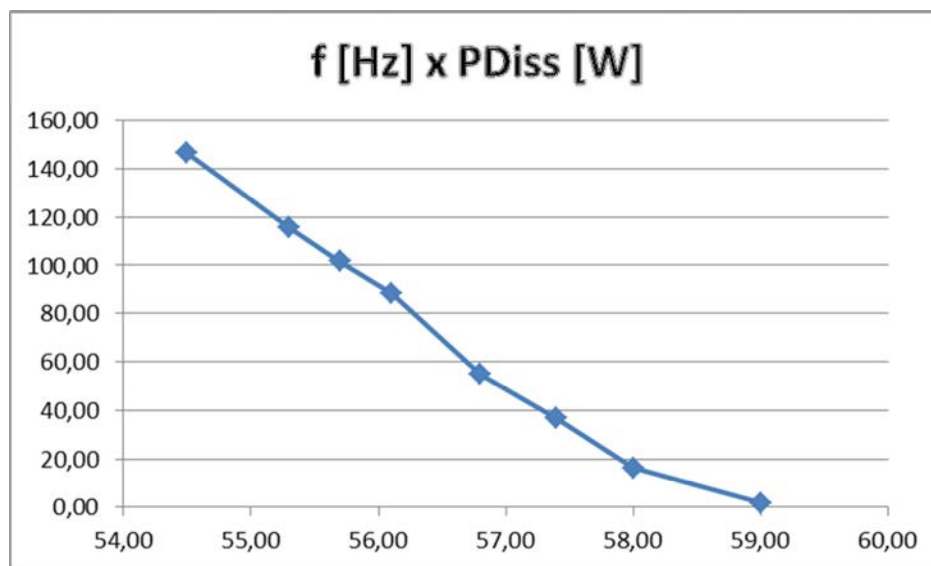
Figura 29: Gráfico frequência versus velocidade do motor.



Fonte: da autora.

A potência dissipada também sofre um aumento constante. Dado que é uma função da resistência, cujo valor é constante, e da corrente de frenagem, a qual também tem seu valor aumentado conforme a frequência é diminuída, fica mais explícita a análise de acordo com a Figura 30.

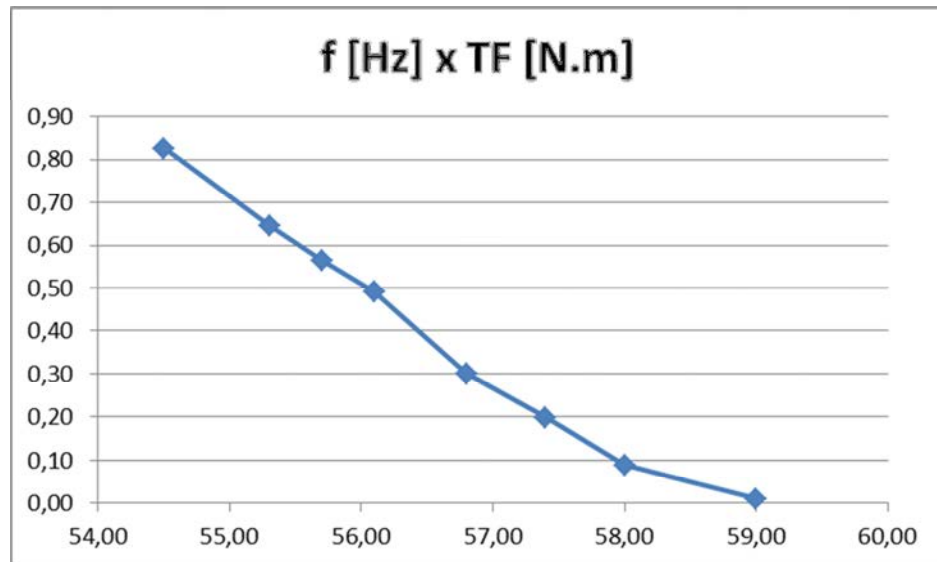
Figura 30: Gráfico frequência versus potência dissipada.



Fonte: da autora.

Por outro lado, a velocidade angular de frenagem responde proporcionalmente a frequência, diminuindo conforme esta diminui. Sendo o torque inversamente proporcional a velocidade angular de frenagem e diretamente proporcional a potência dissipada, se um diminui e o outro aumenta (respectivamente), o torque é conseqüentemente cada vez maior, como mostrado na Figura 31.

Figura 31: Gráfico f [Hz] versus Torque [N.m]



Fonte: da autora.

6.4 TRABALHOS FUTUROS

Deve-se destacar que o foco e os objetivos deste trabalho é demonstrar que o conjunto motor de indução acionado por inversor pode funcionar como Freio eletrodinamométrico, e que pode ser utilizado como uma ferramenta bastante útil nos ensaios de motores elétricos para determinação do comportamento durante as condições operacionais.

Desta será focado neste trabalho apenas os objetivos gerais e específicos previamente definidos, não serão discutidos nem aplicados os ensaios normalizados exigidos por normas internacionais.

No entanto a comprovação que o conjunto inversor MIT funcionando como freio, de certa forma, considerando as teorias discutidas sobre os freios, conduziu o leitor a entender que os ensaios normalizados poderão ser executados utilizando o equipamento proposto neste trabalho. O processo de instrumentação do equipamento aqui proposto servirá como um dos temas para trabalhos futuros.

Outra proposta para desenvolvimento de trabalhos futuros será utilizar a proposta deste freio dinamométrico para realizar os ensaios normalizados e compará-los com os resultados obtidos com ensaios realizados com os freios tradicionais.

6.5 CONCLUSÃO

O trabalho atingiu plenamente os objetivos delineados previamente pela pesquisa, uma vez que os resultados obtidos foram plenamente satisfatórios, comprovando por meio de resultados laboratoriais que a proposta apresentada é factível.

Neste contexto os objetivos gerais foram atingidos uma vez que o conjunto inversor e MIT podem ser utilizados como freio eletrodinamométrico e assim contribuir como mais um ferramental para desenvolvimento de técnicas de eficiência energética e uso racional da energia.

No referente aos objetivos específicos novamente o alvo foi alcançado uma vez que dentro da área freios eletrodinamométricos foi inserido uma nova categoria que poderá ser utilizado tendo com vantagens o baixo custo (motor de indução) e os inversores de frequência, na atualidade a custos vantajosos, e de fácil manuseio e programação. Em termos didáticos este equipamento pode ainda proporcionar inúmeros experimentos não só na área de máquinas elétricas como também na disciplina acionamentos elétricos.

REFERÊNCIAS

ABESCO - Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. **Brasil tem a energia mais cara para a indústria.** 2014. Disponível em: <file:///C:/Users/Gabriela/SkyDrive/TG/Fontes Oficiais/Brasil tem a energia mais cara para a indústria _ Abesco.html>. Acesso em: 03 dez. 2015.

SOCIESC - Sociesc Educação e Tecnologia. **Acionamento de motores com inversor de frequência.** 2015.

BEM- Balanço energético nacional. Brasília: 2014. 288 p.

BORTOLETTO, Fábio José. **Inversores de frequência.** Altus Evolução em Automação, 2009.

YASKAWA - **Drive ca série V1000 Yaskawa:** drive com controle vetorial compacto. 2015.

MASCHERONI, M. José M.; LICHTBLAU, M. Marcos; GERARDI, Denise. **Guia de aplicação: Inversores de Frequência.** 2. ed. Jaraguá do Sul: Weg Automação, 2004. 196 p.

MOREIRA, Nelson José Hümbler. **RESOLUÇÃO NORMATIVA No 414.** Jacareí: Aneel Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012.

WEG. **Motores elétricos:** Linha de Produtos, Características, Especificação Instalação e Manutenção. Jaraguá do Sul: Weg Automação, 2015. 145 p.

REIS, Luiz Octávio Mattos dos; KLAIBER, Walter; VISCONTI, Antonio Carlos. **Aspectos técnicos sobre o funcionamento e a utilização dos freios eletrodinamométricos.** Taubaté: Lorenzo do Brasil, 2015.

REIS, Luiz Octávio Mattos dos; ROSSI, Ronaldo. **Circuito equivalente, diagrama fasorial, operação a vazio e com rotor bloqueado.** Taubaté: Schooltec Treinamentos Técnicos, 2015.

REIS, Luiz Octávio Mattos dos; ROSSI, Ronaldo. **Torque e escorregamento em motores assíncronos trifásicos**. Taubaté: Schooltec Treinamentos Técnicos, 2015.

REIS, Luiz Octávio Mattos dos; ROSSI, Ronaldo. **Acionamentos elétricos**. Taubaté: Astra Serviços Técnicos, 2015.

REIS, Luiz Octávio Mattos dos; ROSSI, Ronaldo. **Estudo do fluxo magnético nos motores de indução trifásicos: estatores**. Taubaté: Schooltec Treinamentos Técnicos, 2015.

REIS, Luiz Octávio Mattos dos; ROSSI, Ronaldo. **Partes componentes e características principais das máquinas assíncronas**. Taubaté: Schooltec Treinamentos Técnicos, 2015.

REIS, Luiz Octávio Mattos dos; SILVA, Valberto Ferreira da. **Aspectos técnicos sobre o funcionamento e a utilização do freio de foucault**. Taubaté: Schooltec Treinamentos Técnicos, 2015.

TORO, Vicent Del. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Guaratinguetá: Ltc, 1994.